

## **Analisis Kelelahan Akibat Aliran Internal dan Beban Eksternal Pada Pipa Bawah Laut Yang Mengalami *Freespan***

Nama Mahasiswa : Hilman Syarif  
NRP : 4310100004  
Jurusan : Teknik Kelautan – FTK ITS  
Dosen Pembimbing : Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D  
Ir. J. J. Soedjono, M.Sc.

### **ABSTRAK**

Aliran eksternal dan internal fluida dalam pipa yang dapat menyebabkan vibrasi sehingga berakibat pada kelelahan pada pipa bawah laut telah selesai dianalisis. Analisis dilakukan dengan mempertimbangkan variasi *flowrates* aliran internal fluida serta panjang *freespan*. *Freespan* pipa bawah laut yang digunakan dalam analisis ini adalah yang tidak memenuhi kriteria *screening* kelelahan menurut DNV RP F-105. Berdasarkan hasil *screening*, panjang *freespan* yang harus dilakukan analisis kelelahan lebih lanjut adalah *freespan* dengan panjang 13 meter atau lebih. Kemudian dipilih tiga *freespan* yang tidak memenuhi kriteria *screening* kelelahan, yaitu *freespan* dengan panjang 23 meter, 30 meter, dan 36 meter. Selanjutnya menghitung tegangan pada *freespan* akibat variasi beban *pressure* akibat fluida yang mengalir di dalam pipa dan arus yang mengenai pipa. *Pressure* tersebut didapat dari output *software* CFD. Pada hasil analisis ini didapatkan bahwa peningkatan *flowrates* pada inlet berbanding lurus dengan *pressure* yang dihasilkan oleh fluida sehingga tegangan yang dihasilkan juga bertambah besar. Semakin besar tegangan yang dialami *freespan*, umur kelelahannya akan semakin kecil. Sehingga bisa disimpulkan semakin besar *flowrates* semakin kecil umur kelelahan *freespan* pipa bawah laut.

**Kata kunci** : *freespan*, aliran internal, aliran eksternal, *flowrates*, tegangan, umur kelelahan.

## **Fatigue Analysis Caused By Internal Flow and External Load On The Subsea Pipeline That Experiencing Freespan**

Name : Hilman Syarif  
Reg. Number : 4310100004  
Department : Ocean Engineering – FTK ITS  
Supervisors : Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D  
Ir. J. J. Soedjono, M.Sc.

### **ABSTRACT**

Fluid external and internal flow in the pipeline which can cause vibration resulting in subsea pipeline fatigue has been completely analyzed. Analysis is done by considering the variation of fluid internal flow flowrates and freespan length. Subsea pipeline freespan used in this analysis are those which do not fulfill the fatigue screening criteria in accordance with DNV RP F-105. Based on screening result, freespan length that must be done the further analysis are freespan with the length of 13 meter or more. Then, three freespan which do not fulfill the fatigue screening criteria are chosen; freespan with the length of 23 meter, 30 meter, and 36 meter. The next step is counting the freespan stress caused by pressure load variation as a result of fluid flowing in the pipeline and flow hitting the pipeline. That pressure is obtained from CFD software output. From this analysis result, it is shown that the enhancement of flowrates at the inlet is directly proportional with pressure produced by fluid, so that stress produced is bigger. The bigger the stress experienced by freespan, the smaller the fatigue life. It can be concluded that the bigger the flowrates, the smaller the fatigue life of subsea pipeline freespan.

**Keywords** : freespan, internal flow, external flow, flowrates, stress, fatigue life.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

Getaran pada pipa bawah laut merupakan hal yang pasti terjadi. Tetapi yang perlu diperhatikan adalah apakah getaran tersebut bisa menyebabkan umur kelelahan pipa bawah laut semakin pendek sehingga menyebabkan pipa bawah laut bisa mengalami kegagalan dalam waktu yang relatif singkat. Getaran pada pipa bawah laut sendiri diakibatkan oleh aliran internal dan eksternal fluida pada pipa.

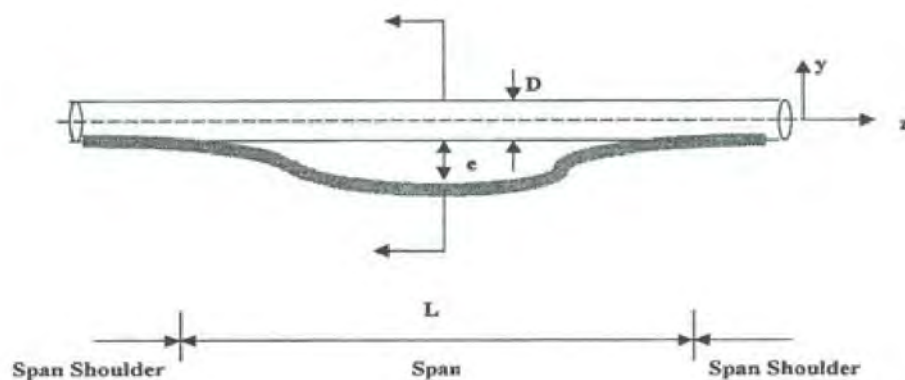
Sentosa (2009) mengatakan bahwa kenaikan jumlah *flowrates* berbanding lurus dengan tekanan yang ditimbulkan oleh fluida. Sehingga semakin besar tekanan fluida yang bekerja pada pipa, maka getaran yang dialami pipa juga semakin besar. Chamelia (2009) juga melakukan penelitian tentang getaran pada pipa. Selain menganalisis aliran internal fluida, Chamelia (2009) juga menganalisis aliran eksternal fluida yang menyebabkan getaran pada pipa. Dalam penelitiannya, aliran eksternal fluida yang menjadi penyebab utama getaran pada pipa adalah VIV. Penelitian yang dilakukan oleh Sentosa (2009), Chamelia (2009), masih belum memasukkan aspek kelelahan yang akan dialami pipa akibat getaran yang terjadi. Padahal kelelahan merupakan faktor yang sangat penting dalam struktur, karena kelelahan tersebut menentukan kapan struktur tersebut akan mengalami kegagalan.

Umur kelelahan suatu pipa bawah laut merupakan hal yang sangat penting untuk diketahui. Karena menentukan pipa tersebut mengalami kegagalan atau tidak. Apabila pada saat digunakan pipa tersebut mengalami kegagalan, maka akan berdampak bagi lingkungan sekitar maupun perusahaan sendiri. Bagi lingkungan akan mengakibatkan pencemaran, sedangkan bagi perusahaan akan mengakibatkan kerugian yang cukup besar karena hidrokarbon yang ditransportasikan melalui pipa mengalami kebocoran. Oleh karena itu diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai hal tersebut.

## 2.2 *Freespan*

Secara bahasa *span* adalah rentang. Dalam hubungannya dengan pipa bawah laut, *span* adalah rentang dimana terdapat bagian pipa bawah laut yang tidak tertumpu. *Span* pada pipa bawah laut dapat terjadi ketika kontak antara pipa bawah laut dan dasar laut hilang. Menurut Kenny (1993), *span* pada pipa bawah laut dapat terjadi selama proses instalasi, bisa juga karena kontur dasar laut yang tidak merata, atau bisa juga terjadi selama masa operasi pipa yang disebabkan oleh *scouring* maupun pergerakan horizontal pipa. *Freespan* pada pipa bawah laut terjadi ketika kontak antara pipa dan *seabed* hilang dan memiliki jarak pada permukaan *seabed*.

Analisis *freespan* akan menghasilkan berapa panjang *span* yang diijinkan agar tegangan yang terjadi pada daerah *freespan* tidak melebihi tegangan yang telah ditentukan.

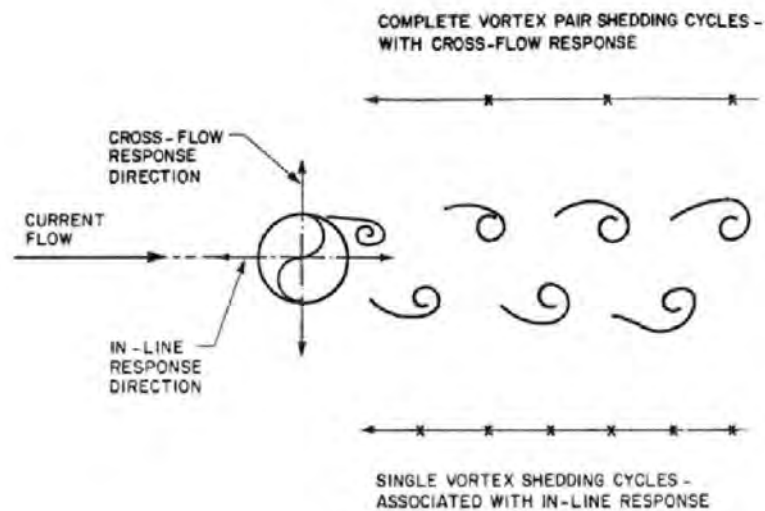


**Gambar 2.1** Gambaran Umum *Freespan*

(Bai *et al.*, 2005)

## 2.3 *Vortex Induced Vibration*

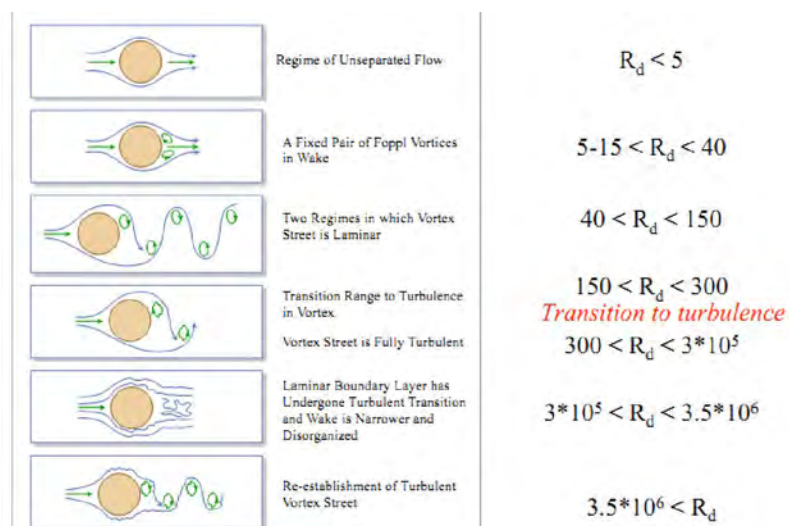
*Vortex Induced Vibration* (VIV) merupakan getaran yang diakibatkan oleh fenomena dari interaksi antara fluida dan struktur pipa. *Vortex* sendiri merupakan aliran dimana partikel dari fluida mengalami rotasi terhadap titik pusatnya. *Vortex shedding* merupakan pelepasan *vortex*, yang mempunyai kecepatan tangensial dan transversal yang konstan dan bervariasi terhadap radiusnya.



**Gambar 2.2** *Vortex Shedding*

(Bai *et al.*, 2005)

Akibat adanya *vortex shedding* ini, pipa yang dilaluinya akan mengalami tekanan lokal yang dapat menyebabkan pipa bergetar atau berosilasi pada frekuensi tertentu. Getaran ini akan menyebabkan pipa mengalami kelelahan yang berujung pada kegagalan. Gambar di bawah ini menunjukkan bentuk *vortex* yang terjadi berdasarkan nilai *reynolds number*.



**Gambar 2.3** Daerah Aliran akibat *Reynolds Number*

(Lienhard, 1966 dalam Techet, 2005)

Terjadi tidaknya VIV pada aliran di sekitar struktur dapat diketahui dari harga parameternya. Parameter VIV tersebut adalah sebagai berikut:

- a. Strouhal *number*

$$S_t = \frac{f_s D}{U} \quad (2.1)$$

dengan

$f_s$  = frekuensi *vortex shedding* (Hz)

$U_e$  = kecepatan efektif partikel (m/s)

$D$  = diameter struktur (m)

- b. Reynolds *number*

$$R_e = \frac{U_e D}{\nu} \quad (2.2)$$

dengan

$U_e$  = kecepatan efektif partikel (m/s)

$D$  = diameter struktur (m)

$\nu$  = viskositas kinematis air laut (m<sup>2</sup>/s)

- c. *Reduced velocity*

$$V_{rn} = \frac{U_e}{f_n D} \quad (2.3)$$

dengan

$U_e$  = kecepatan efektif partikel (m/s)

$f_n$  = frekuensi natural pipa (Hz)

$D$  = diameter struktur (m)

- d. Frekuensi *vortex shedding*

$$f_s = \frac{S_t}{U_e D} \quad (2.4)$$

dengan

$S_t$  = strouhal *number*

$U_e$  = kecepatan efektif partikel (m/s)

$D$  = diameter struktur (m)

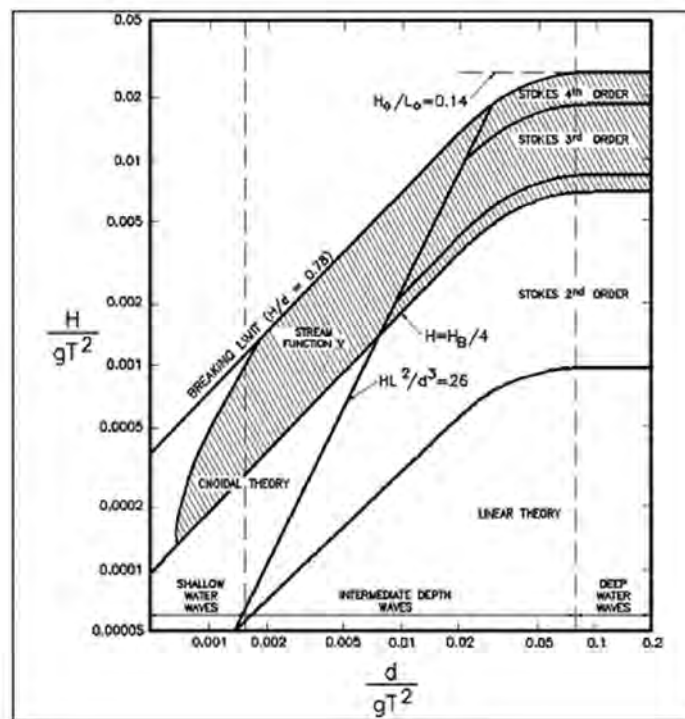
## 2.4 Gelombang dan Arus Laut

### 2.4.1 Teori Gelombang

Untuk menghitung beban gelombang yang bekerja pada pipa bawah laut, pertama-tama harus diketahui terlebih dahulu teori gelombang mana yang akan kita gunakan. Data-data yang diperlukan dalam penentuan teori gelombang adalah tinggi gelombang ( $H$ ), periode gelombang ( $T$ ) serta kedalaman perairan ( $d$ ). Kemudian data-data tersebut dimasukkan ke dalam persamaan:

$$\left[ \frac{H}{gT^2} \right] \text{ dan } \left[ \frac{d}{gT^2} \right]$$

Persamaan tersebut kemudian digunakan dalam grafik *region of validity*. Dalam grafik *region of validity* sendiri terdapat beberapa teori gelombang yaitu teori gelombang Airy (linier), Stokes, serta teori gelombang Cnoidal.



**Gambar 2.4** *Regions of Validity for Various Wave Theories*  
(SPM, 1984)

Teori gelombang yang paling sering digunakan untuk melakukan perhitungan adalah teori gelombang stoke. Teori gelombang stoke

merupakan teori yang menghasilkan solusi atau hasil yang lebih akurat daripada teori gelombang linear (Airy). Teori gelombang stokes memasukkan ekspresi deret kecepatan potensial dalam persamaan Laplace dan syarat batas dasar laut. Dalam analisis ini, teori gelombang yang digunakan adalah stokes orde 2. Persamaan untuk menghitung kecepatan horizontal partikel air dan percepatannya adalah sebagai berikut (Dean *et al.*, 1984).

$$u(z) = \frac{H}{2} \frac{gk}{\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh(kh)} \cos(\theta) + \frac{3}{16} H^2 \sigma k \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4(kh)} \cos(2\theta) \quad (2.5)$$

$$a(z) = \frac{H}{2} gk \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh(kh)} \sin(\theta) - \frac{H^2}{4} gk^2 \frac{\sin(2\theta)}{\sinh(2kh)} + \frac{3}{8} H^2 \sigma^2 k \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4(kh)} \sin(2\theta) \quad (2.6)$$

dengan

- $u$  = kecepatan horizontal partikel air (m/s)
- $a$  = percepatan horizontal partikel air (m/s<sup>2</sup>)
- $H$  = tinggi gelombang (m)
- $g$  = percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)
- $k$  = nomor gelombang ( $2\pi/L$ )
- $L$  = panjang gelombang (m)
- $z$  = jarak dari MSL (m)
- $h$  = *still water level* (m)
- $\sigma$  = frekuensi angular gelombang ( $2\pi/T$ )
- $T$  = periode gelombang (s)
- $\theta$  = sudut fase perambatan gelombang

#### 2.4.2 Arus

Selain gelombang, arus laut juga memberikan gaya terhadap struktur yang berada di laut. Arus akibat pasang surut memiliki kecepatan yang semakin berkurang seiring dengan bertambahnya kedalaman sesuai fungsi non-linier. Sedangkan arus yang disebabkan oleh angin memiliki karakter yang sama,



tetapi dalam fungsi linier. Kecepatan arus tersebut dirumuskan dalam formulasi matematis berikut:

$$\frac{U}{U_0} = \left(\frac{y}{y_0}\right)^{1/7} \quad (2.7)$$

dengan

$U$  = kecepatan arus pada ketinggian  $y$  dari *seabed* (m/s)

$U_0$  = kecepatan arus yang diketahui pada  $y_0$  (m/s)

$D$  = diameter luar pipa (m)

$y$  = ketinggian orbit setinggi  $y$  dari *seabed* (m)

$y_0$  = ketinggian orbit setinggi  $y_0$  dari *seabed* (m)

#### 2.4.3 Kecepatan Efektif Partikel Air

Menurut Mouselli (1981) untuk mencari kecepatan efektif partikel air dapat menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$U_w^2 = 0.78 \cdot 8U \left(\frac{D}{y}\right)^{0.286} \quad (2.8)$$

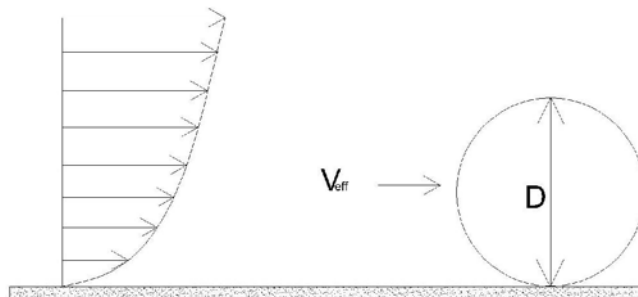
dengan

$U_w$  = kecepatan efektif partikel air (m/s)

$U$  = kecepatan arus pada ketinggian  $y$  dari *seabed* (m/s)

$y$  = ketinggian orbit setinggi  $y$  dari *seabed* (m)

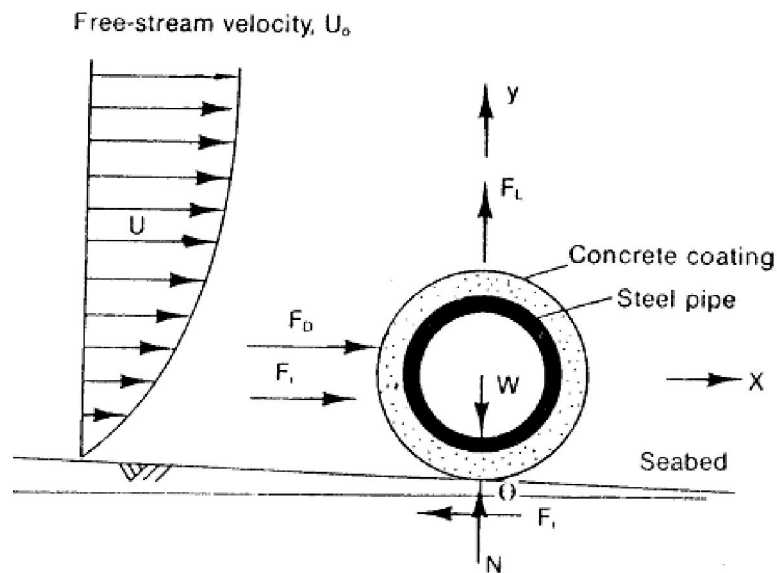
Profil dari kecepatan efektif partikel air laut dapat dijelaskan pada gambar di bawah ini.



**Gambar 2.5** Distribusi Kecepatan Partikel Air

## 2.5 Gaya Hidrodinamis

Pipa bawah laut yang terkena suatu aliran atau arus akan mengalami gaya hidrodinamis yang disebabkan oleh arus maupun gelombang laut. Berikut ini adalah komponen-komponen gaya hidrodinamis yang bekerja pada pipa.



**Gambar 2.6** Gaya Hidrodinamis pada Pipa  
(Mouselli, 1981)

### 2.5.1 Gaya Drag

Gaya *drag* adalah gaya hidrodinamika yang menentang pergerakan suatu benda yang bergerak dalam fluida (cair atau gas). Gaya *drag* dihasilkan karena adanya kontak benda padat dengan fluida (cair atau gas). Gaya drag yang bekerja pada struktur pipa bawah laut persatuan panjang dirumuskan sebagai berikut (Mouselli, 1981):

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D D U |U| \quad (2.9)$$

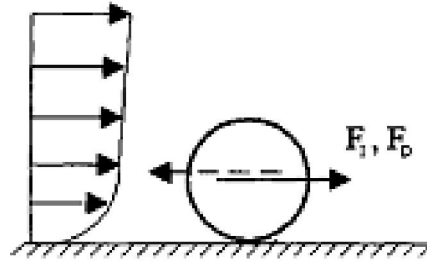
dengan

$\rho$  = masa jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$U$  = kecepatan efektif partikel (arus dan gelombang) ( $\text{m/s}$ )

$C_D$  = koefisien *drag*

$D$  = diameter luar pipa ( $\text{m}$ )



**Gambar 2.7** Gaya inersia dan *drag* yang bekerja pada pipa  
(Bai *et al.*, 2005)

### 2.5.2 Gaya Inersia

Pipa bawah laut yang terkena fluida yang berakselerasi mengalami gaya yang proposional terhadap akselerasi, gaya ini disebut gaya inersia. Berikut ini adalah persamaan yang menunjukkan komponen gaya inersia per satuan panjang pipa bawah laut (Mouselli, 1981):

$$F_I = \rho C_M \left[ \frac{\pi D^2}{4} \right] a_n \quad (2.10)$$

dengan

$\rho$  = masa jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$C_M$  = koofisien inersia

$D$  = diameter luar pipa (m)

$a_n$  = percepatan horizontal partikel fluida ( $\text{m/s}^2$ )

### 2.5.3 Gaya Angkat (*Lift Force*)

Gaya angkat adalah gaya yang dihasilkan oleh suatu fluida terhadap struktur yang bergerak melewatinya, gaya ini tegak lurus dengan arah pergerakan fluida (Mouselli, 1981):

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L D U^2 \quad (2.11)$$

dengan

$\rho$  = masa jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$C_L$  = koefisien angkat

$D$  = diameter luar pipa (m)

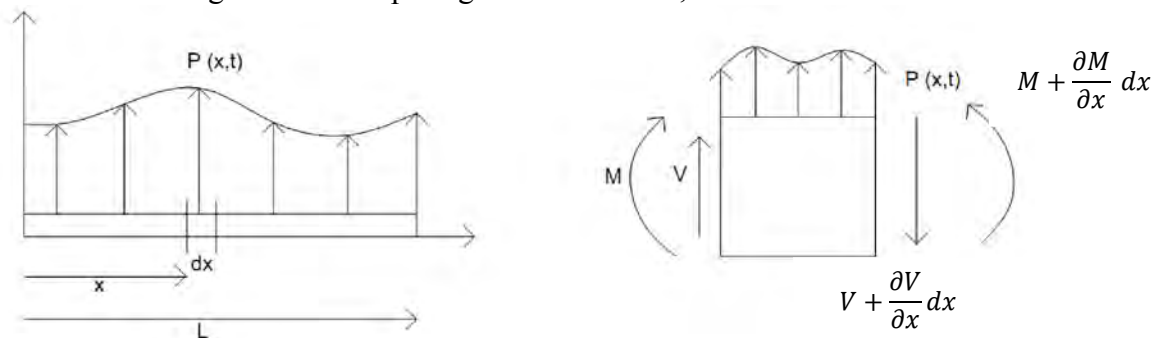
$U$  = kecepatan efektif partikel (arus dan gelombang) (m/s)

## 2.6 Persamaan Gerak Melintang Balok Menerus

Balok yang memiliki kekakuan  $EI_{(x)}$  dan massa tiap satuan panjang  $m_{(x)}$  yang menerima gaya  $P_{(x,t)}$  persamaan defleksinya dapat dirumuskan dengan menggunakan teori balok Bernoulli-Euler. Asumsi yang dipakai adalah (Imron, 1990 dalam Atmojo, 1993):

- Sumbu netral balok tidak berkontraksi dan penampang melintang balok tegak lurus sumbu balok serta tetap tegak lurus selama setelah deformasi.
- Material bahan elastis dan homogeny pada setiap penampang melintang.
- Regangan kearah  $y$  dan  $z$  diabaikan jika dibandingkan kearah  $x$ .

Balok dengan kondisi seperti gambar di bawah,



**Gambar 2.8** Balok Bernoulli-Euler

dapat diselesaikan dengan menggunakan hukum kesetimbangan gaya dan momen, seperti pada persamaan berikut:

$$\sum F = ma$$

$$V - \left( V + \frac{\partial V}{\partial x} dx \right) + P dx = \rho A dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} = P - \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

$$\sum \mathbb{M} 0$$

$$M + V dx - \left( M + \frac{\partial M}{\partial x} dx \right) = 0$$

$$V = \frac{\partial M}{\partial x}$$

dengan  $= EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$  , maka dengan menggabungkan persamaan di atas diperoleh:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = P - \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) = P - \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x^2} \left( EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = P \quad (2.12)$$

Persamaan tersebut merupakan persamaan Bernoulli-Euler. Dan frekuensi natural balok tersebut adalah

$$\omega_n = \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 \sqrt{\frac{E_{st} I_{st}}{M}} \quad (2.13)$$

dengan

$L$  = Panjang *span* aktual pipa (m)

$E_{st}$  = Modulus Young pipa (Pa)

$I_{st}$  = Momen Inersia pipa (m<sup>4</sup>)

$M$  = massa total per satuan panjang

## 2.7 Metode Likelihood of *Failure* (LOF)

Fluida yang mengalir dan mengenai pipa akan memberikan tekanan pada dinding pipa yang bisa menyebabkan vibrasi pada pipa. Untuk menentukan apakah vibrasi yang terjadi pada pipa masih dalam batas toleransi digunakan

metode *likelihood of failure* (MTD Ltd). LOF bukan merupakan probabilitas kegagalan serta bukan alat untuk mengukur kegagalan suatu sistem. Ruang lingkup LOF adalah mengidentifikasi masalah vibrasi, lalu menganalisa dan memberikan solusi.

Metodologi perhitungan dengan metode LOF adalah:

1. Mengidentifikasi penyebab eksitasi getaran  
 Dalam penelitian ini hanya dibahas eksitasi yang disebabkan oleh *Flow Induced Vibration*.
2. Menghitung nilai LOF pada pipa  
 Berdasarkan MTD Ltd, langkah-langkah untuk menghitung nilai LOF adalah sebagai berikut:
  - Menetapkan tipe bentangan pipa:
    - a. Membuat kategori tipe bentangan pipa dengan memasukkan nilai diameter pipa pada rumusan Tabel 2.1 di bawah.
    - b. Setelah diperoleh tabel kategori tipe bentangan, lalu mencocokkan bentangan aktual dengan membandingkan panjang bentangan dengan interval bentangan yang ada sehingga diperoleh tipe yang sesuai.

**Tabel 2.1** Tipe Bentangan (MTD, 2008)

Support Arrangement	Span Length Criteria
Stiff	$L_{span} \leq -1.2346 * 10^{-5} D_{ext}^2 + 0.02 D_{ext} + 2.0563$
Medium Stiff	$L_{span} > -1.2346 * 10^{-5} D_{ext}^2 + 0.02 D_{ext} + 2.0563$ $L_{span} \leq -1.1886 * 10^{-5} D_{ext}^2 + 0.025262 D_{ext} + 3.3601$
Medium	$L_{span} > -1.1886 * 10^{-5} D_{ext}^2 + 0.025262 D_{ext} + 3.3601$ $L_{span} \leq -1.5968 * 10^{-5} D_{ext}^2 + 0.033583 D_{ext} + 4.429$
Flexible	$L_{span} > -1.5968 * 10^{-5} D_{ext}^2 + 0.033583 D_{ext} + 4.429$

- Menghitung nilai  $pv^2$   
 Dimana,  $\rho$  adalah densitas fluida di dalam pipa dan  $v$  adalah kecepatan fluida yang mengalir di dalam pipa.

- Menghitung nilai  $F_v$  (Angka Vibrasi) berdasarkan Tabel 2.2 di bawah ini.

**Tabel 2.2** Metode Menghitung  $F_v$  (MTD, 2008)

Support Arrangement	Range of Outside Diameter	$F_v$	$\alpha$	$\beta$
Stiff	60 mm to 762 mm	$\alpha \left( \frac{D_{out}}{T} \right)^\beta$	$446187 + 646 D_{out} + 9.17 \cdot 10^{-4} D_{out}^3$	$0.1 \ln(D_{out}) - 1.3739$
Medium Stiff	60 mm to 762 mm	$\alpha \left( \frac{D_{out}}{T} \right)^\beta$	$283921 + 370 D_{out}$	$0.1106 \ln(D_{out}) - 1.501$
Medium	273 mm to 762 mm	$\alpha \left( \frac{D_{out}}{T} \right)^\beta$	$150412 + 209 D_{out}$	$0.0815 \ln(D_{out}) - 1.3269$
Medium	60 mm to 219 mm	$\exp \left[ \alpha \left( \frac{D_{out}}{T} \right)^\beta \right]$	$13.1 - 4.75 \cdot 10^{-3} D_{out} + 1.41 \cdot 10^{-5} D_{out}^2$	$-0.132 + 2.28 \cdot 10^{-4} D_{out} - 3.72 \cdot 10^{-7} D_{out}^2$
Flexible	273 mm to 762 mm	$\alpha \left( \frac{D_{out}}{T} \right)^\beta$	$41.21 D_{out} + 49397$	$0.0815 \ln(D_{out}) - 1.3842$
Flexible	60 mm to 219 mm	$\exp \left[ \alpha \left( \frac{D_{out}}{T} \right)^\beta \right]$	$1.32 \cdot 10^{-5} D_{out}^2 - 4.42 \cdot 10^{-3} D_{out} + 12.22$	$2.84 \cdot 10^{-4} D_{out} - 4.62 \cdot 10^{-7} D_{out}^2 - 0.164$

Menghitung nilai LOF dengan menggunakan rumus  $LOF = \rho v^2 / F_v$ . Apabila nilai  $LOF < 0.5$  maka bentangan pipa masih bisa dikatakan aman terhadap vibrasi akibat aliran internal.

## 2.8 Getaran Akibat Aliran Internal di Dalam Pipa

Aliran internal fluida di dalam pipa dapat memberikan tekanan pada pipa, yang mengakibatkan pipa mengalami defleksi. Aliran internal fluida ini mengakibatkan frekuensi natural pipa berkurang sehingga pipa akan mudah mengalami resonansi. Berikut adalah persamaan gerakan pipa lurus yang terdapat aliran *steady* di dalamnya (Laura *et al.*, 1987):

$$E_{st} I_{st} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho_{cont} A_{int} v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + 2 \rho_{cont} A_{int} v \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} + M \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (2.14)$$

dengan:

$E_{st}$  = Modulus Young pipa

$I_{st}$  = momen inersia pipa

$\rho_{cont}$  = masa jenis fluida di dalam pipa

$A_{int}$  = luas internal pipa

$v$  = kecepatan fluida di dalam pipa

$M$  = massa total per satuan panjang

$$y = \sum_{n=1,3,5...} a_n \sin \frac{n\pi x}{L} \sin \omega_j t + \sum_{n=2,4,6...} a_n \sin \frac{n\pi x}{L} \cos \omega_j t$$

Suku pertama dan terakhir pada persamaan di atas adalah kekakuan dan massa yang selalu muncul yang tidak dipengaruhi oleh adanya fluida di dalam pipa. Suku kedua menyatakan gaya yang diperlukan untuk mengubah arah aliran fluida agar sesuai dengan kelengkungan pipa. Suku ketiga menyatakan gaya yang terjadi akibat adanya efek coriolis. Pada pipa yang dialiri fluida di dalamnya, maka frekuensi natural pipa dapat diketahui dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\frac{\omega_1}{\omega_n} = \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_c} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.15)$$

dengan:

$\omega_1$  = frekuensi natural pipa yang dialiri fluida

$\omega_n$  = frekuensi natural pipa tanpa fluida

$v_c$  = kecepatan kritis fluida

$$= \frac{\pi}{L} \left[ \frac{EI}{\rho_{cont} A} \right]^{1/2} \quad (2.16)$$

## 2.9 Teori Tegangan

### 2.9.1 Tegangan Normal

Tegangan normal adalah tegangan yang bekerja dalam arah tegak lurus terhadap permukaan bahan atau benda. Tegangan normal yang bekerja pada benda bisa berupa tegangan tarik (*tensile stress*) atau tegangan tekan (*compressive stress*). Berikut adalah persamaan dari tegangan normal.

$$\sigma_n = \frac{P}{A} \quad (2.17)$$

dengan:

$\sigma_n$  = tegangan normal (Pa)

$P$  = gaya tekan/tarik (N)

$A$  = luas penampang yang dikenai gaya (m<sup>2</sup>)



### 2.9.2 Tegangan Ekvivalen (Von Misses)

Dalam suatu elemen elastis yang dikenai system pembebanan 3 dimensi, akan terdapat system tegangan 3 dimensi yang muncul. Artinya pada tiap titik elemen tersebut bekerja tegangan yang bekerja dalam arah yang berbeda, serta arah dan besarnya tegangan tersebut berubah dari titik satu ke titik lainnya. Pada tiap-tiap sumbu dapat diketahui tegangan utama ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) yang dihitung dari komponen tegangan dari persamaan berikut:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x - \sigma_0 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y - \sigma_0 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z - \sigma_0 \end{pmatrix} = 0 \quad (2.18)$$

dengan:

$\sigma_0$  = tegangan utama yang bekerja pada sumbu

$\sigma_x$  = tegangan arah sumbu x

$\sigma_y$  = tegangan arah sumbu y

$\sigma_z$  = tegangan arah sumbu z

$\sigma_{xy}$  = tegangan arah sumbu xy

$\sigma_{yz}$  = tegangan arah sumbu yz

Penggabungan tegangan-tegangan utama pada suatu elemen merupakan cara untuk mengetahui nilai dari tegangan maksimum yang bekerja pada titik tersebut. Salah satu cara untuk mendapatkan tegangan maksimum tersebut adalah dengan menggunakan formula tegangan ekuivalen (Von Misses). Tegangan maksimum ini dapat digunakan untuk menentukan apakah material kita gagal atau tidak jika dibandingkan dengan tegangan *yield* material itu sendiri. Berikut ini adalah formula tegangan Von Misses:

$$\sigma_e = \left( \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \right)^{0.5} \quad (2.19)$$

dengan:

$\sigma_e$  = tegangan maksimum

$\sigma_1$  = tegangan utama 1

$\sigma_2$  = tegangan utama 2

$\sigma_3$  = tegangan utama 3

## 2.10 Screening Kriteria Kelelahan (*Fatigue*)

Kriteria *screening* disini digunakan untuk kelelahan yang disebabkan oleh *Vortex Induced Vibration* (VIV) dan pembebanan gelombang secara langsung yang dikombinasikan dengan kondisi pembebanan arus. Apabila salah satu dari kriteria *screening* berikut ini tidak terpenuhi, maka harus dilakukan analisis kelelahan pada *span* tersebut. Berikut adalah *screening* kriteria kelelahan menurut DNV RP F105.

- **Frekuensi natural kondisi *in-line***

$$\frac{f_{n,IL}}{\gamma_{IL}} > \frac{U_{c,10\ 0year}}{V_{R,onset}^{IL} \cdot D} \left(1 - \frac{L/D}{250}\right) \frac{1}{\bar{\alpha}} \quad (2.20)$$

dengan

$f_{n, IL}$  = frekuensi natural kondisi *in-line*

$\gamma_{IL}$  = kriteria *screening* untuk kondisi *in-line*

$$\bar{\alpha} = \text{rasio aliran arus} = \frac{U_{c,10\ 0year}}{U_{w,1year} + U_{c,1\ 00\ year}} \quad (2.21)$$

$D$  = diameter luar pipa

$L$  = panjang span

$U_{c, 100year}$  = kecepatan arus pada pipa dengan kala ulang 100 tahun

$U_{w,1year}$  = nilai kala ulang 1 tahun untuk *wave induced velocity*

$V_{R,ons et}^{IL}$  = nilai *in-line onset* untuk *reduced velocity*

$$= \begin{cases} \left(\frac{1.0}{\gamma_{on, IL}}\right) \text{ untuk } K_{sd} < 0.4 \\ \left(\frac{0.6+K_{sd}}{\gamma_{on, IL}}\right) \text{ untuk } 0.4 < K_{sd} < 1.6 \\ \left(\frac{2.2}{\gamma_{on, IL}}\right) \text{ untuk } K_{sd} > 1.6 \end{cases} \quad (2.22)$$

$$K_{sd} = K_s / \gamma_k$$

$$\gamma_k = \text{safety factor untuk damping}$$

$$\gamma_{on,IL} = \text{safety factor untuk nilai onset in-line}$$

- **Frekuensi natural kondisi *cross-flow***

$$\frac{f_{n,CF}}{\gamma_{CF}} > \frac{U_{c,10 \text{ year}} + U_{w,1 \text{ year}}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D} \quad (2.23)$$

dengan

$$f_{n,CF} = \text{frekuensi natural kondisi cross-flow}$$

$$\gamma_{CF} = \text{kriteria screening untuk kondisi cross-flow}$$

$$V_{R,onset}^{CF} = \text{nilai cross-flow onset untuk reduced velocity}$$

$$= \frac{3\psi_{proxi,onset}\psi_{trench,onset}}{\gamma_{on,CF}} \quad (2.24)$$

$\psi_{proxi,onset}$  = faktor koreksi yang memperhitungkan jarak dengan seabed

$$= \begin{cases} \frac{1}{5} \left( 4 + 1.25 \frac{e}{D} \right) & \text{untuk } \frac{e}{D} < 0.8 \\ 1 & \end{cases} \quad (2.25)$$

$\psi_{trench,onset}$  = faktor koreksi yang memperhitungkan efek pipa pada trench

$$= 1 + 0.5 \frac{1.25d - e}{D} \quad (2.26)$$

$e$  = jarak antara pipa dan seabed

$d$  = kedalaman trench

### 2.9.1 Frekuensi Natural Span

Berdasarkan DNV RP F-105 (2006), nilai *fundamental natural frequency* untuk *span* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut

$$f \approx C_1 \sqrt{1 + CSF} \sqrt{\frac{EI}{m_e L_{eff}^4} \left( 1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}} + C_3 \left( \frac{\delta}{D} \right)^2 \right)} \quad (2.27)$$

dengan

$C_1, C_3$  = koefisien kondisi batas

$E$  = modulus young baja

$I$  = momen inersia baja

$CSF$  = *concrete stiffness enhancement factor*

$m_e$  = massa efektif

$D$  = diameter luar pipa

$P_{cr}$  = beban tekuk kritis =  $(1 + CSF)C_2\pi^2EI/(L_{eff})^2$  (2.28)

$\delta$  = defleksi statis

$$= C_6 \frac{qL_{eff}^4}{EI(1+CSF)} \frac{1}{\left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}}\right)} \quad (2.29)$$

$S_{eff}$  = gaya axial efektif

$$= H_{eff} - \Delta P_i A_i (1 - 2\nu) - A_s E \Delta T \alpha_e \quad (2.30)$$

$H_{eff}$  = *effective lay tension*

$\Delta P_i$  = perbedaan tekanan internal relatif

$A_i$  = luas penampang internal pipa

$\nu$  = *poisson ratio*

$E$  = modulus young pipa

$\Delta T$  = perbedaan temperature relative

$\alpha_e$  = koefisien ekspansi termal

Nilai koefisien untuk  $C_1$  sampai  $C_6$  diberikan pada DNV RP F-105 untuk kondisi batas yang berbeda.

## 2.11 Kelelahan (*Fatigue*)

Menurut ASM International (2005) kelelahan adalah perubahan struktural permanen yang lokal dan progresif yang terjadi pada material yang dikenai tegangan fluktuatif di beberapa titik atau banyak titik dan kemungkinan berujung pada retak atau patah setelah mengalami beberapa fluktuasi tegangan. Dalam segi kondisi tegangan dan regangan yang menyebabkan kelelahan, kelelahan dapat didefinisikan sebagai perubahan struktural yang

progresif, lokal, dan permanen yang terjadi dalam material yang dikenai regangan berulang atau berfluktuasi pada tegangan nominal yang memiliki nilai maksimum kurang dari kekuatan *yield* statis materi. Sehingga dapat dikatakan kelelahan terjadi akibat adanya beban siklis yang mengenai suatu struktur.

Pada pipa bawah laut, kelelahan biasanya terjadi pada daerah *free span*. *Free span* bisa terjadi pada saat instalasi atau saat operasi. Kelelahan pada *free span* salah satunya disebabkan oleh adanya beban dari lingkungan terutama oleh gelombang dan arus laut. Adanya pembebanan pada pipa ini, menyebabkan getaran yang cukup besar pada pipa. Getaran ini akan menimbulkan frekuensi yang cukup besar pada pipa. Peristiwa yang terjadi akibat getaran tersebut dikatakan sebagai getaran akibat adanya *vortex* atau biasa disebut dengan *Vortex Induced Vibration* (VIV).

### 2.10.1 Hukum Palmgren-Miner

Bangunan lepas pantai lebih cenderung mengalami kelelahan karena menerima beban lingkungan yang bersifat siklis. Beban lingkungan yang bersifat siklis yang berpengaruh terhadap terjadinya kelelahan adalah beban akibat gelombang dan arus. Kerusakan kumulatif yang disebabkan perbedaan *range* tegangan dapat dihitung dengan Palmgren-Miner. Perhitungan kelelahan sambungan struktur didasarkan pada hukum Palmgren-Miner, yang dapat dinyatakan dalam persamaan (2.31).

$$D_{fat} = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (2.31)$$

dengan

$D_{fat}$  = akumulasi kerusakan akibat kelelahan

$n_i$  = banyaknya siklus tegangan dalam rentang tegangan,  $S_i$

$N_i$  = banyaknya siklus yang dibutuhkan untuk terjadi kegagalan

### 2.10.2 Kurva S-N

Pada analisis kelelahan dapat menggunakan kurva S-N. Kurva S-N digunakan untuk kelelahan pada material yang mempunyai siklus tegangan berulang-ulang pada *magnitude* konstan. Dengan N adalah jumlah siklus rentang tegangan S (MPa atau N/mm<sup>2</sup>) yang menyebabkan kerusakan struktur. Jadi kurva S-N adalah garis rata-rata sebaran data yang diturunkan dengan pendekatan regresi. Berikut adalah persamaan kurva S-N:

$$\log N = \log A - m \log S \quad (2.32)$$

dengan

N = banyak siklus untuk mencapai kegagalan

log a = konstanta

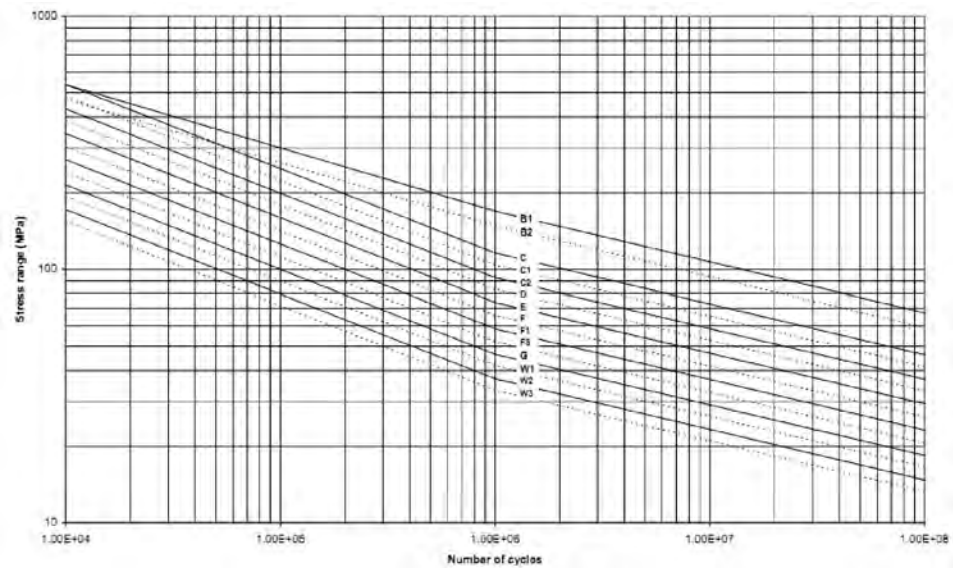
m = kemiringan kurva S-N

S = rentang tegangan.

**Tabel 2.3** Data Kurva S-N untuk *Free Corrosion* (DNV RP-C203, 2011)

S-N curve	$\log \bar{a}$ For all cycles $m = 3.0$	Thickness exponent k
B1	12.436	0
B2	12.262	0
C	12.115	0.15
C1	11.972	0.15
C2	11.824	0.15
D	11.687	0.20
E	11.533	0.20
F	11.378	0.25
F1	11.222	0.25
F3	11.068	0.25
G	10.921	0.25
W1	10.784	0.25
W2	10.630	0.25
W3	10.493	0.25
T	11.687	0.25 for SCF $\leq 10.0$ 0.30 for SCF $>10.0$


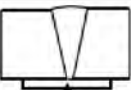

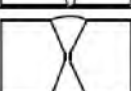
Kurva S-N yang akan dipakai dalam analisis perhitungan kelelahan penelitian ini adalah kurva S-N dengan pengelasan tipe F1. Berikut adalah kurva S-N tipe root F1.



**Gambar 2.9** Kurva S-N  
(DNV RP-C203, 2011)

Berikut ini adalah bentuk pengelasan yang biasanya digunakan pada pipa bawah laut berdasarkan DNV RP C-203.

**Tabel 2.4** Klasifikasi Pengelasan pada Pipa Bawah Laut  
(DNV RP-C203, 2011)

<i>Description</i>		<i>Tolerance requirement</i>	<i>S-N curve</i>	<i>Thickness exponent k</i>	<i>SCF</i>
<i>Welding</i>	<i>Geometry and hot spot</i>				
Single side	 Hot spot	$\delta \leq \min(0.15t, 3 \text{ mm})$	F1	0.00	1.0
		$\delta > \min(0.15t, 3 \text{ mm})$	F3	0.00	1.0
Single side on backing	 Hot spot	$\delta \leq \min(0.1t, 2 \text{ mm})$	F	0.00	1.0
		$\delta > \min(0.1t, 2 \text{ mm})$	F1	0.00	1.0
Single side	 Hot spot		D	0.15	Eq. (2.10.1)
Double side	 Hot spot		D	0.15	Eq. (2.10.1)

### 2.10.3 Umur Kelelahan Pipa

Berdasarkan DNV RP-F105, umur kelelahan untuk pipa bawah laut dirumuskan sebagai berikut.

$$T_{life} = \frac{T_{exposure}}{D_{fat}} \times \eta \quad (2.32)$$

dengan

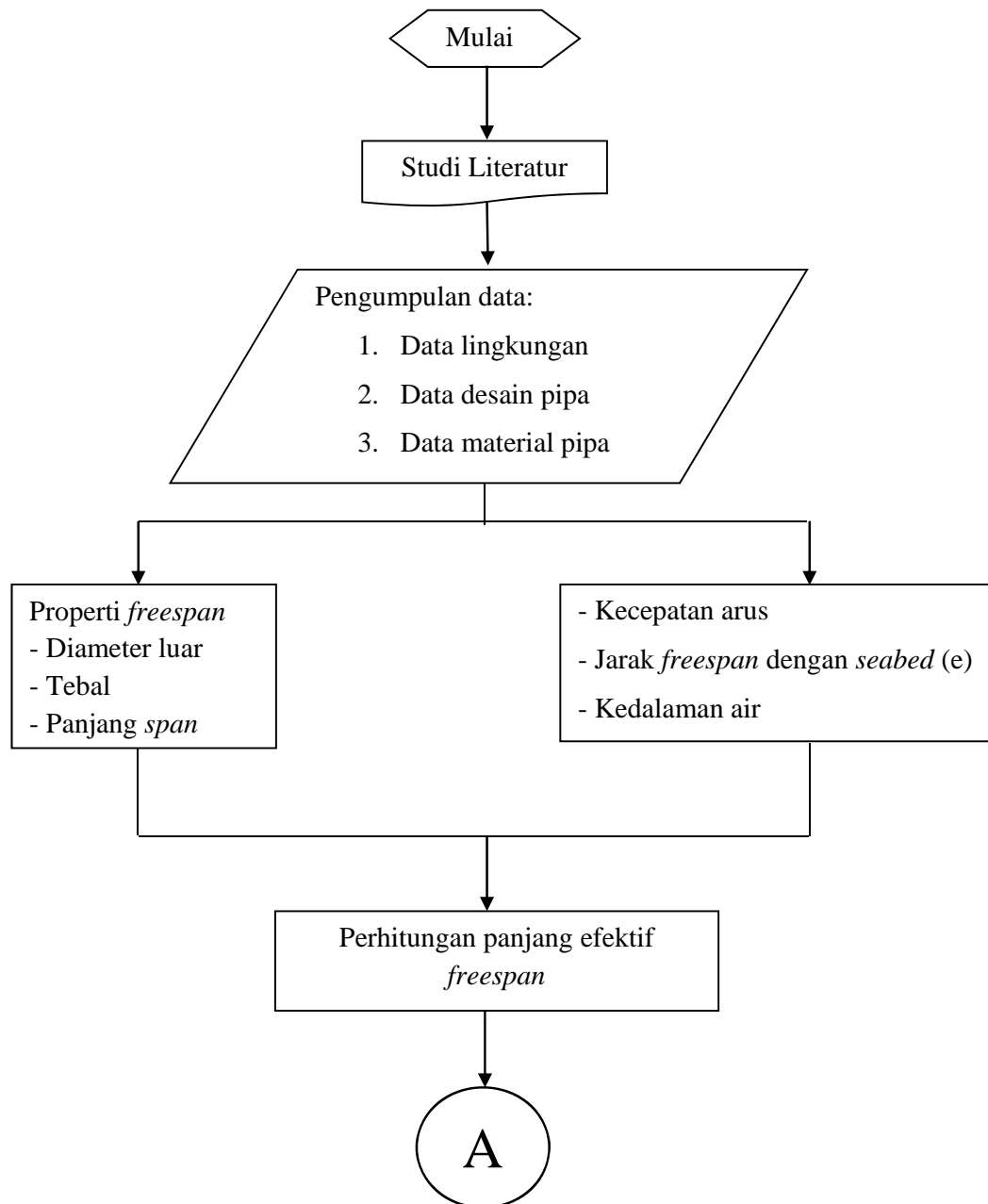
$T_{exposure}$  = umur pembebanan

$\eta$  = *safety factor*

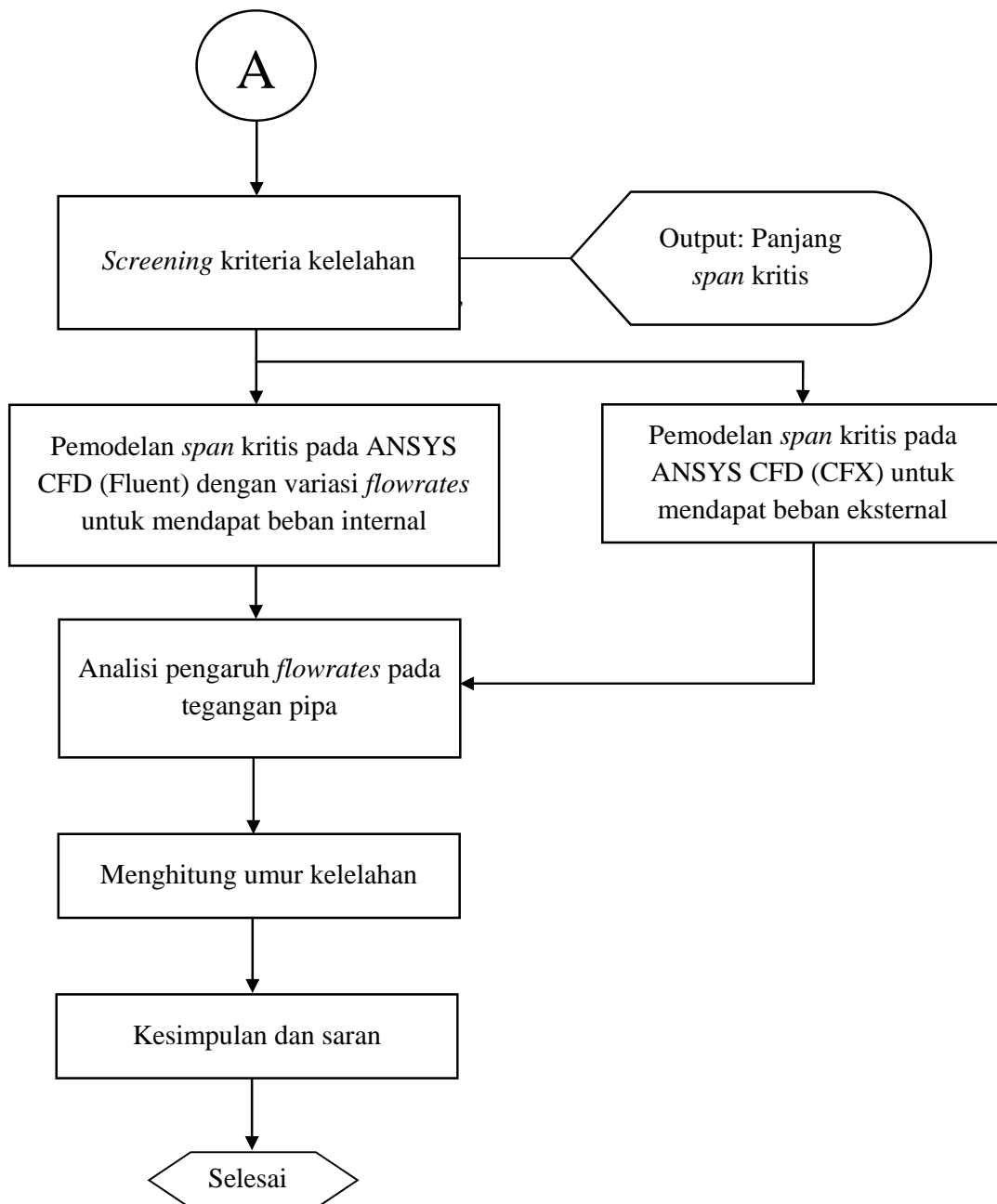


**BAB III**  
**METODOLOGI PENELITIAN**

**3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir**



**Gambar 3.1** Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir



**Gambar 3.1** Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir (Lanjt.)

### 3.2 Prosedur Analisis

#### 1. Studi Literatur

Tahap awal dalam pengerjaan tugas akhir ini yaitu mengumpulkan semua materi yang berasal dari jurnal, buku, laporan tugas akhir, serta *code* atau *standar* yang akan digunakan sebagai bahan untuk studi.

#### 2. Pengumpulan Data

Data yang digunakan pada tugas akhir ini merupakan data pipa milik SANTOS yang berada di Maleo *Field*.

**Tabel 3.1** Data Pipa

Parameter	Unit	Deskripsi
Diameter Luar	mm	355.6 (14 inch)
Tebal Pipa	mm	14.3
Material	-	API 5L Grade X65 PSL 2 CS
SMYS	Mpa	448
SMTS	Mpa	531
<i>Young Modulus</i>	Mpa	$2.07 \times 10^5$
<i>Poison Ratio</i>	-	0.3
<i>Steel Density</i>	kg/m <sup>3</sup>	7850
<i>Content density</i>	kg/m <sup>3</sup>	85
<i>Content Spesific Gravity</i>		1.021
<i>Coefficient of Thermal Expansion</i>	/ °C	$1.17 \times 10^{-5}$
<i>Pipeline Service</i>	-	Gas
<i>Design Pressure</i>	psig	2000 (2014.7 psi)
<i>Hydrotest Pressure</i> (1.25 x <i>Design Pressure</i> )	psig	2500
<i>Maximum Inlet Temperature</i>	°C	49

**Table 3.2** Data *Corrosion Coating*

<b>Data</b>	<b>Unit</b>	<b>Deskripsi</b>
Bahan	-	Asphalt Enamel
Tebal <i>Corrosion Coating</i>	mm	4.5
<i>Corrosion Coating Density</i>	kg/m <sup>3</sup>	1300
<i>Corrosion Coating Cutback</i>	mm	150

**Table 3.3** Data *Concrete Coating*

<b>Data</b>	<b>Unit</b>	<b>Deskripsi</b>
Tebal <i>Concrete Coating</i>	mm	30
<i>Concrete Coating Density</i>	kg/m <sup>3</sup>	2800
<i>Corrosion Coating Cutback</i>	mm	225

**Table 3.4** Data Lingkungan

<b>Parameter</b>		<b>Unit</b>	<b>Nilai</b>
<i>Water Depth</i>		m	55.0
<i>Chart Datum (CD) is equal to MSL</i>		m	0.0
<i>Storm Surge</i>	<i>1-yr return period</i>	m	0.03
	<i>100-yr return period</i>	m	0.13
<i>Highest Astronomical Tide (HAT)</i>		m	1.29 <i>above</i> CD
<i>Lowest Astronomical Tide (LAT)</i>		m	1.38 <i>below</i> CD
<i>Seawater Density</i>		kg/m <sup>3</sup>	1025
<i>Seawater Temperature</i>	<i>Max.</i>	°C	31
	<i>Min.</i>	°C	21

**Tabel 3.5** Data Gelombang dan Arus

Parameter	Unit	Return Period (Tahun)		
		1	20	100
Max. Individual Wave				
Height, H <sub>max</sub>	m	5.83	8.55	9.34
Period, T <sub>max</sub>	sec	11.71	14.25	14.90
Significant Wave				
Height, H <sub>s</sub>	m	3.24	4.75	5.19
Period, T <sub>s</sub>	sec.	9.01	10.96	11.46
Current Speed				
at 90% Water depth	m/s	0.52	0.55	0.62
at 100% Water depth	m/s	0.49	0.49	0.49

**Tabel 3.6** Data Gelombang Maksimum (*All Direction*)

	Wave Parameter	Unit	Return Period		
			1 Year	20 Years	100 Years
Significant Wave	$H_s$	m	3.24	4.75	5.19
	$T_s$	s	9.01	10.96	11.46
	$L_s$	m	125.89	180.58	194.91
	$H_s/L_s$	-	0.03	0.03	0.03
Individual Wave	$H_{max}$	m	5.83	8.55	9.34
	$T_{max}$	s	11.71	14.25	14.90
	$L_{max}$	m	202.07	273.84	291.79
	$H_{max}/L_{max}$	-	0.03	0.03	0.03

**Tabel 3.7** Data Tanah

Parameter	Unit	Nilai
Tipe Tanah	-	Clay
<i>Undrained Shear Strength</i>	kPa	2.0
<i>Friction Angle</i>	Deg	0.0
<i>Submerged Weight</i>	kN/m <sup>3</sup>	3.2

**Tabel 3.8** Data Kedalaman

Condition	KP		Water Depth
	From	To	
Operation	0.00	3.00	55
	3.00	6.00	60
	6.00	7.36	66

**Tabel 3.9** Panjang *Span* Aktual *Pipeline* Berdasarkan Survei

No.	KP (km)	Panjang Span	No.	KP (km)	Panjang Span	No.	KP (km)	Panjang Span
1	0	26	21	0.692	8	41	1.71	5
2	0.034	15	22	0.706	23	42	1.735	5
3	0.056	15	23	0.743	8	43	1.783	12
4	0.089	11	24	0.795	11	44	1.803	2
5	0.108	8	25	0.904	13	45	1.808	36
6	0.123	10	26	0.949	6	46	1.849	4
7	0.152	15	27	0.976	12	47	1.856	8
8	0.172	7	28	1.038	13	48	1.869	10
9	0.183	7	29	1.062	23	49	1.893	13
10	0.208	5	30	1.094	2	50	1.912	18
11	0.223	5	31	1.187	13	51	1.957	14
12	0.235	9	32	1.267	5	52	2.039	27
13	0.248	5	33	1.277	15	53	2.092	8
14	0.258	4	34	1.346	21	54	2.108	5
15	0.272	5	35	1.389	15	55	2.115	31
16	0.282	3	36	1.443	21	56	2.152	12
17	0.517	5	37	1.544	21	57	2.179	7
18	0.523	31	38	1.587	13	58	2.2	2
19	0.571	5	39	1.633	12	59	2.204	9
20	0.625	14	40	1.675	25	60	2.244	4

**Tabel 3.9** Panjang *Span* Aktual *Pipeline* Berdasarkan Survei (Lanjt.)

No.	KP (km)	Panjang Span
61	2.264	15
62	2.321	7
63	2.336	23
64	2.384	6
65	2.412	16
66	2.44	13
67	2.501	10
68	2.535	14
69	2.58	3
70	2.596	4
71	2.603	5
72	2.632	23

No.	KP (km)	Panjang Span
73	2.679	3
74	2.695	17
75	2.764	6
76	2.789	7
77	2.806	14
78	2.839	27
79	2.871	10
80	2.914	24
81	2.953	11
82	2.969	17
83	3	30

3. Perhitungan Panjang Efektif *Freespan*

Perhitungan panjang efektif pada *freespan* ini berdasarkan DNV RP F-105. Perhitungan panjang efektif *span* dilakukan untuk arah pembebanan *in-line* dan *cross-flow*.

4. *Screening* Kriteria Kelelahan

Setelah dilakukan perhitungan panjang efektif *span*, langkah selanjutnya adalah melakukan *screening* pada *span* tersebut. Perhitungan *screening* kelelahan ini didasarkan pada DNV RP F-105. Hasil dari perhitungan ini adalah panjang *span* kritis (panjang *span* yang tidak memenuhi kriteria *screening*) pada bentang pipa.

5. Pemodelan *Span* Kritis pada ANSYS CFD untuk Mendapat Beban Eksternal

Setelah panjang *span* kritis ditentukan, langkah selanjutnya adalah memodelkan *span* tersebut pada *software* ANSYS CFD. Pemodelan ini dilakukan guna mendapatkan beban eksternal yang diakibatkan oleh arus dan gelombang pada pipa.

- Penggambaran Model

Pemodelan struktur pipa yang mendapatkan beban eksternal meliputi penampang pipa serta *boundary condition* yang akan dijadikan objek analisis. Penggambaran model dilakukan dengan program *meshing* dari ANSYS yaitu ICEM.

Model yang telah dibuat dipersyaratkan untuk memiliki *boundary condition* dan *domain*. *Boundary condition* merupakan kondisi atau jenis dari batas area kerja fluida. Pada pemodelan dibuat sisi masuk (*inlet*), sisi keluar (*outlet*), dan objek simulasi. *Domain* menunjukkan jenis fluida kerja yang digunakan misal air, udara dan padat (*solid*). Pada simulasi ini, geometri yang telah menjadi permukaan (*surface*) selanjutnya diberi volume yang berupa susunan partikel berbentuk tetra (*meshing*). Pemberian volume domain menggunakan program ICEM.

- Simulasi

Program simulasi CFD dan *solver* digunakan untuk menganalisa model yang telah memiliki volume *mesh* dan *boundary condition*. *Boundary condition* yang telah dibuat selanjutnya diberi parameter-parameter input yang lebih spesifik. *Boundary condition* diusahakan sesuai dengan kondisi sebenarnya. Program *solver* yang dipakai untuk amendapatkan beban eksternal akibat arus adalah CFX. CFX ini digunakan untuk penyelesaian dari input parameter simulasi, dimana digunakan iterasi persamaan fluida untuk menghasilkan parameter sesuai dengan input masukan.

6. Pemodelan *Span* Kritis pada ANSYS CFD dengan Variasi *Flowrates* untuk Mendapat Beban Internal

Selain memodelkan *span* kritis untuk mendapat beban eksternal, pada ANSYS CFD juga dilakukan pemodelan untuk mendapatkan beban akibat aliran internal. Pemodelan tersebut dilakukan dengan melakukan



variasi *flowrates* fluida pada pipa yaitu 75 MMscfd, 85 MMscfd, 95 MMscfd, 105 MMscfd, dan 120 MMscfd.

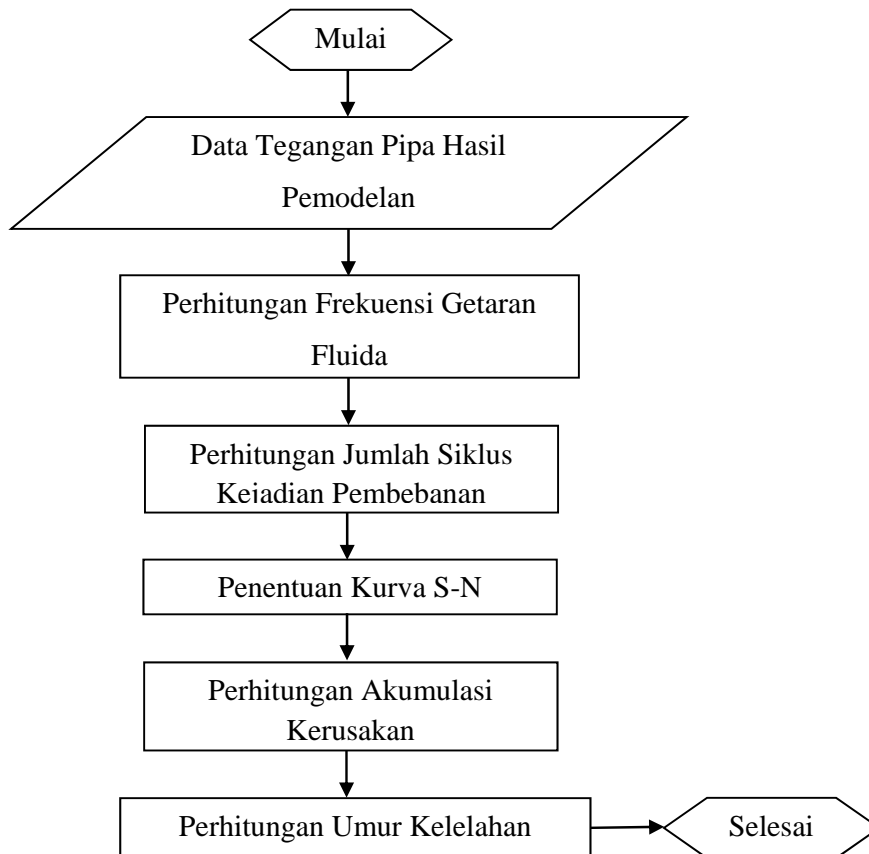
Langkah langkah pemodelan untuk variasi *flowrates* sama dengan pemodelan untuk mendapatkan beban eksternal akibat arus. Tetapi *solver* yang digunakan untuk variasi *flowrates* ini menggunakan Fluent.

#### 7. Analisis Pengaruh *Flowrates* terhadap Tegangan pada Pipa

Setelah dilakukan pemodelan dengan ANSYS Workbench maka didapatkan tegangan-tegangan yang terjadi pada *freespan*. Kemudian akan dianalisis pengaruh arus internal pada tegangan yang dialami pipa.

#### 8. Menghitung Umur Kelelahan

Langkah pengerjaan perhitungan kelelahan pada *freespan*.



**Gambar 3.2** Diagram Alir Pengerjaan Umur Kelelahan

Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, langkah pengerjaan perhitungan kelelahan adalah dimulai dengan mendapatkan data tegangan akibat beban internal dan eksternal pada pipa, serta perhitungan frekuensi getaran fluida yang mengenai pipa. Penentuan kurva S-N di sini digunakan untuk mengetahui berapa siklus yang dibutuhkan pipa tersebut untuk terjadi kegagalan pada rentang tegangan yang ditentukan. Kurva S-N yang dipakai dalam perhitungan adalah kurva F berdasarkan DNV RP C-203. Setelah ditentukan kurva S-N kemudian menghitung umur kelelahan pada pipa menggunakan teori akumulasi kerusakan (hukum Palmgren-Miner).

## BAB IV

### ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Analisis *Freespan*

##### 4.1.1 Perhitungan Properti Pipa

Perhitungan properti pipa di sini, dilakukan untuk menghitung diameter pipa ataupun massa total dari pipa itu sendiri. Perhitungan properti pipa ini digunakan sebagai dasar untuk melakukan perhitungan analisis *freespan* selanjutnya, seperti perhitungan panjang efektif *span*, frekuensi natural, dan *screening*. Berikut adalah perhitungan properti pipa milik SANTOS.

**Tabel 4.1** Perhitungan Properti Pipa

Parameter	Simbol	Persamaan	Nilai	Satuan
Diameter Internal	$D_i$	$D - 2t$	327.00	mm
Diameter <i>Corrosion Coating</i>	$D_{coat}$	$D + 2t_{coat}$	364.60	mm
Diameter <i>Concrete Coating</i>	$D_{conc}$	$D_{coat} + 2t_{conc}$	424.60	mm
Massa pipa (tanpa coating)	$w_1$	$(\pi (D^2 - D_i^2) \rho_{st}) / 4$	120.30	kg/m
Massa fluida	$w_2$	$\pi D_i^2 \rho_{cont}$	7.13	kg/m
Massa <i>Corrosion Coating</i>	$w_3$	$(\pi (D_{coat}^2 - D^2) \rho_{coat}) / 4$	6.61	kg/m
Massa <i>Concrete Coating</i>	$w_4$	$(\pi (D_{conc}^2 - D_{coat}^2) \rho_{conc}) / 4$	104.08	kg/m
Berat Total	$w_t$	$(w_1 + w_2 + w_3 + w_4) g$	2336.06	N/m
<i>Bouyancy</i>	$F_{buoy}$	$(\pi D_{conc}^2 \rho_{sw} g) / 4$	1423.06	N/m
Berat Pipa Tercelup	$w_{sub}$	$w_t - F_{buoy}$	913.01	N/m
Momen Inersia Pipa	$I_{st}$	$(\pi (D^4 - D_i^4)) / 4$	2.24E-04	m <sup>4</sup>
Momen Inersia <i>Concrete</i>	$I_{conc}$	$(\pi (D_{conc}^4 - D_{coat}^4)) / 4$	7.28E-04	m <sup>4</sup>
Modulus young <i>concrete</i>	$E_{conc}$	$10000.f_{conc}^{0.3}$	30242.52	MPa
<i>Concrete Stiffness Enhancement Factor</i>	CSF	$K_c(E_{conc}I_{conc}/E_{st}I_{st})^{0.75}$	1.31E-03	
<i>Internal Sectional Area</i>	$A_{int}$	$\pi D_i^2 / 4$	0.08	m <sup>2</sup>
<i>External Sectional Area</i>	$A_{ext}$	$\pi D_{conc}^2 / 4$	0.14	m <sup>2</sup>
<i>Steel Sectional Area</i>	$A_s$	$\pi (D^2 - D_i^2) / 4$	0.02	m <sup>2</sup>
Massa Struktur Di Udara	$M_{air}$	$w_{sub} g^{-1} + \rho_{sw} A_{ext}$	238.13	kg/m
<i>Spesific Mass of Pipe In the Air</i>	$\rho_s$	$M_{air} / A_{ext}$	1682.62	kg/m <sup>3</sup>

#### 4.1.2 Perhitungan Gelombang dan Arus yang Bekerja pada Pipa

Pada analisis ini, kecepatan gelombang dihitung menggunakan persamaan teori stokes orde 2. Hal ini dikarenakan hasil penarikan grafik *region of validity* menunjukkan teori gelombang yang paling memenuhi untuk digunakan adalah stokes orde 2. Berikut ini adalah hasil perhitungan gelombang dan arus yang bekerja pada pipa.

**Tabel 4.2** Perhitungan Gelombang dan Arus

Perhitungan Gelombang 1 Tahun (Stokes Orde 2)				
Parameter	Simbol	Persamaan	Nilai	Satuan
Nomor Gelombang	k	$2\pi/L_s$	0.049	
Angular Wave frequency	$\sigma$	$2\pi/T_s$	0.697	
Kecepatan partikel gelombang	$U_z$	$\frac{H}{2} \frac{gk}{\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh(kh)} \cos(\theta) + \frac{3}{16} H^2 \sigma k \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4(kh)} \cos(2\theta)$	0.145	m/s
Kecepatan efektif gelombang	$U_w$	$0.778(U_z)^2(D/y_0)^{0.286}$	0.020	m/s
Perhitungan Gelombang 100 Tahun (Stokes Orde 2)				
Parameter	Simbol	Persamaan	Nilai	Satuan
Nomor Gelombang	k	$2\pi/L_s$	0.032 2	
Angular Wave frequency	$\sigma$	$2\pi/T_s$	0.548 0	
Kecepatan partikel gelombang	$U_z$	$\frac{H}{2} \frac{gk}{\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh(kh)} \cos(\theta) + \frac{3}{16} H^2 \sigma k \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4(kh)} \cos(2\theta)$	0.495	m/s
Kecepatan efektif gelombang	$U_w$	$0.778(U_z)^2(D/y_0)^{0.286}$	0.233	m/s
Perhitungan Arus 1 Tahun				
Parameter	Simbol	Persamaan	Nilai	Satuan
Current Velocity Normal to The Pipe	$U_c$	$U_c$	0.498	m/s
Perhitungan Arus 100 Tahun				
Parameter	Simbol	Persamaan	Nilai	Satuan
Current Velocity Normal to The Pipe	$U_c$	$U_c$	0.515	m/s

#### 4.1.3 Perhitungan Gaya Hidrodinamis

Perhitungan gaya hidrodinamis ini dilakukan untuk mengetahui besar gaya yang diakibatkan oleh arus dan gelombang laut terhadap pipa. Gaya

hidrodinamis yang bekerja pada pipa adalah gaya drag dan gaya angkat (*lift*). Berikut adalah perhitungan gaya hidrodinamis yang bekerja pada pipa.

**Tabel 4.3** Perhitungan Gaya Hidrodinamika

Parameter	Simbol	Persamaan	Nilai	Satuan
Keulegan Carpenter Number	KC	$\frac{U_w}{\sigma D}$	0.07	
Rasio kecepatan aliran	$\alpha$	$\frac{U_c}{(U_c + U_w)}$	0.69	
Reynolds Number	Re	$\frac{(U_c + U_w) D}{\nu}$	2.85E+05	
Koefisien Drag	C <sub>d</sub>	$0.65 \times \left( \frac{29}{13} + \frac{4}{13} \log_{10} \left( \frac{k}{D} \right) \right)$	1.03	
Koefisien Inersia	C <sub>L</sub>		0.70	
Gaya Drag	F <sub>D</sub>	$C_D \times \frac{1}{2} \times \rho_{water} \times D_{conc} \times U^2$	125.55	N/m
Gaya Angkat	F <sub>L</sub>	$C_L \times \frac{1}{2} \times \rho_{water} \times D_{conc} \times U^2$	81.53	N/m

#### 4.1.4 Perhitungan *Span* Efektif, Frekuensi Natural *Span*, *Screening*

Berikut adalah perhitungan parameter-parameter yang dibutuhkan untuk menghitung panjang *span* efektif, frekuensi natural dan *screening* pada *freespan*.

**Tabel 4.4** Perhitungan Parameter-Parameter

Parameter	Simbol	Persamaan	Nilai	Satuan
Vertical Dynamic Soil Stiffness	K <sub>v</sub>	$\frac{C_v}{(1 - \nu)} \left( \frac{2}{3} \frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{D_{conc}}$	5.58E+06	N/m <sup>2</sup>
Lateral Dynamic Soil Stiffness	K <sub>L</sub>	$C_L (1 + \nu) \left( \frac{2}{3} \frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{D_{conc}}$	3.63E+06	N/m <sup>2</sup>
Sea Bed Correction Factor	$\psi_{proxi,onset}$	$\begin{cases} \frac{1}{5} \left( 4 + 1.25 \frac{e}{D} \right) & \text{for } \frac{e}{D} < 0.8 \\ 1 & \text{else} \end{cases}$	1	
Trench Effect Correction Factor	$\psi_{trench,onset}$	$1 + 0.5 \frac{\Delta}{D}$	1	

**Tabel 4.4** Perhitungan Parameter-Parameter (Lanjt.)

Parameter	Simbol	Persamaan	Nilai	Satuan
Reduction Function	$\psi_{a, IL}$	$\psi_{a, IL} = \begin{cases} 0.0 & \text{for } \alpha < 0.5 \\ (\alpha - 0.5) / 0.3 & \text{for } 0.5 < \alpha < 0.8 \\ 1.0 & \text{for } \alpha > 0.8 \end{cases}$	1.00	
Koefisien added mass	$C_a$	$\begin{cases} 0.68 + \frac{1.6}{1 + 5 \cdot (\frac{e}{D})} & \text{untuk } \frac{e}{D} < 0.8 \\ 1 & \text{untuk } \frac{e}{D} \geq 0.8 \end{cases}$	1.00	
Massa efektif (termasuk added mass)	$M_e$	$M_{air} + \rho \cdot A_{ext} \cdot C_a$	383.19	kg/m
Total Modal Damping Ratio	$\zeta_T$	$\zeta_T + \zeta_{soil} + \zeta_h$	0.03	
Stability Parameter	$K_s$	$\frac{4 \pi m_e \zeta_T}{\rho D^2}$	0.28	
Design Value of Stability Parameter	$K_{sd}$	$\frac{K_s}{\gamma_k}$	0.24	
Effective Axial Force	$S_{eff}$	$H_{eff} - \Delta P_i A_i (1 - 2\nu) - A_s E \Delta T \alpha_e$	8.07E+04	N
In-Line Onset Value for The Reduced Velocity	$V_{R, onset}^{IL}$	$\begin{cases} \left( \frac{1.0}{\gamma_{on, IL}} \right) & \text{untuk } K_{sd} < 0.4 \\ \left( \frac{0.6 + K_{sd}}{\gamma_{on, IL}} \right) & \text{untuk } 0.4 < K_{sd} < 1.6 \\ \left( \frac{2.2}{\gamma_{on, IL}} \right) & \text{untuk } K_{sd} > 1.6 \end{cases}$	0.91	
Crossflow Onset Value for The Reduced Velocity	$V_{R, onset}^{CF}$	$\frac{3 \times \psi_{proxi, onset} \times \psi_{trench, onset}}{\gamma_{on, CF}}$	2.50	

Setelah dilakukan perhitungan parameter parameter di atas, didapat hasil perhitungan sebagai berikut:

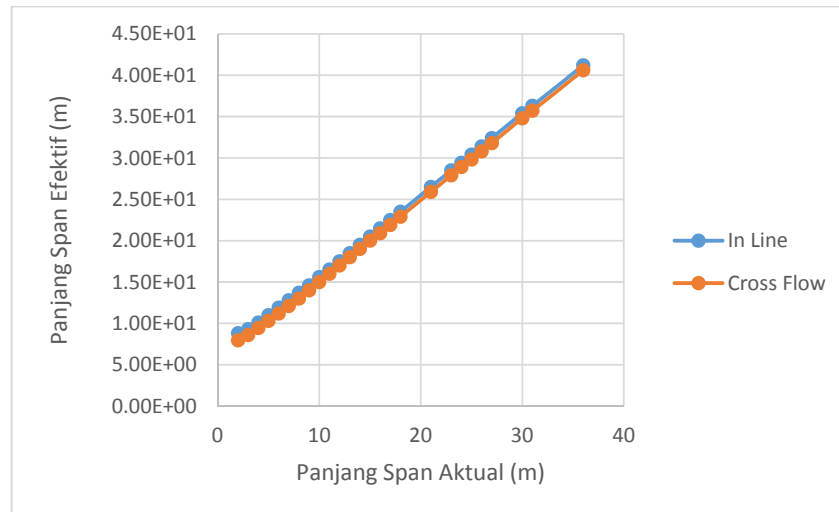
**Tabel 4.5** Perhitungan Panjang Efektif, Frekuensi Natural, *Screening*

L (m)	L <sub>eff</sub> (m)		Natural Frequency (Hz)		Kriteria <i>Screening</i>		Hasil Screening (f <sub>n</sub> > kriteria <i>screening</i> )
	In-Line	Cross-Flow	In-Line	Cross-Flow	In-Line	Cross-Flow	
2	8.9238	8.0388	6.9034	8.4959	1.9063	0.7065	Memenuhi
3	9.3814	8.6590	6.2510	7.3293	1.8880	0.7065	Memenuhi
4	10.1979	9.5161	5.2974	6.0766	1.8697	0.7065	Memenuhi
5	11.0851	10.4110	4.4907	5.0848	1.8514	0.7065	Memenuhi
6	11.9805	11.3011	3.8514	4.3226	1.8331	0.7065	Memenuhi
7	12.8660	12.1751	3.3458	3.7310	1.8148	0.7065	Memenuhi
8	13.7356	13.0302	2.9414	3.2636	1.7965	0.7065	Memenuhi
9	14.6288	14.0422	2.5988	2.8170	1.7782	0.7065	Memenuhi
10	15.6157	15.0347	2.2865	2.4637	1.7599	0.7065	Memenuhi
11	16.6080	16.0300	2.0269	2.1734	1.7416	0.7065	Memenuhi
12	17.6030	17.0262	1.8094	1.9325	1.7233	0.7065	Memenuhi
13	18.5991	18.0224	1.6257	1.7307	1.7050	0.7065	Tidak Memenuhi
14	19.5953	19.0178	1.4692	1.5601	1.6867	0.7065	Tidak Memenuhi
15	20.5912	20.0124	1.3350	1.4148	1.6684	0.7065	Tidak Memenuhi
16	21.5863	21.0058	1.2190	1.2902	1.6501	0.7065	Tidak Memenuhi
17	22.5805	21.9980	1.1180	1.1827	1.6318	0.7065	Tidak Memenuhi
18	23.5737	22.9891	1.0297	1.0895	1.6135	0.7065	Tidak Memenuhi
21	26.5469	25.9557	0.8218	0.8754	1.5586	0.7065	Tidak Memenuhi
23	28.5241	27.9286	0.7181	0.7735	1.5219	0.7065	Tidak Memenuhi
24	29.5113	28.9138	0.6740	0.7318	1.5036	0.7065	Tidak Memenuhi
25	30.4977	29.8982	0.6341	0.6955	1.4853	0.7065	Tidak Memenuhi
26	31.4834	30.8820	0.5980	0.6640	1.4670	0.7065	Tidak Memenuhi
27	32.4683	31.8653	0.5652	0.6367	1.4487	0.7065	Tidak Memenuhi
30	35.4197	34.8121	0.4827	0.5772	1.3938	0.7065	Tidak Memenuhi
31	36.4024	35.7936	0.4597	0.5636	1.3755	0.7065	Tidak Memenuhi
36	41.3109	40.6978	0.3688	0.5324	1.2840	0.7065	Tidak Memenuhi

\*Memenuhi = Tidak diperlukan analisis kelelahan lebih lanjut  
 Tidak memenuhi = Memerlukan analisis kelelahan lebih lanjut

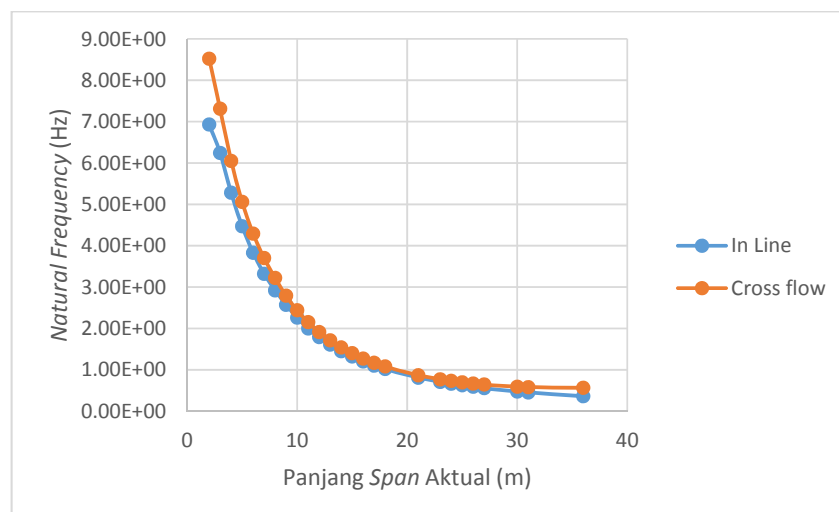
Tabel di atas merupakan hasil perhitungan panjang efektif *span* yang dihitung berdasarkan panjang *span* aktual, massa efektif pipa, serta

parameter-parameter lainnya. Panjang *span* efektif sangat dipengaruhi oleh panjang aktual *span* itu sendiri. Dari tabel di atas dapat diketahui jika panjang *span* aktual semakin panjang, panjang *span* efektif yang terjadi juga semakin panjang. Hal tersebut dapat dilihat pada grafik di bawah.



**Gambar 4.1** Grafik Hasil Perhitungan Panjang *Span* Efektif

Selain mempengaruhi panjang *span* efektif, panjang *span* aktual juga mempengaruhi hasil dari frekuensi natural yang didapatkan. Hal tersebut dapat dilihat pada grafik di bawah.



**Gambar 4.2** Grafik Hasil Perhitungan Frekuensi Natural Pipa



Dari grafik diatas terlihat frekuensi natural untuk gerakan *cross-flow* lebih besar dibandingkan frekuensi natural gerakan *in-line* pada panjang aktual *span* yang sama. Sedangkan hubungan antara panjang *span* aktual terhadap frekuensi naturalnya adalah semakin panjang *span* aktualnya, maka frekuensi natural pipa tersebut semakin kecil. Semakin kecilnya frekuensi natural pipa, mengakibatkan pipa tersebut rentan terhadap kelelahan. Sehingga perlu dilakukan analisis kelelahan.

Dari Tabel 4.5 di atas dapat diketahui panjang *span* yang tidak memenuhi kriteria *screening* kelelahan. Panjang *span* yang harus dilakukan analisis kelelahan lebih lanjut adalah *span* dengan panjang mulai 13 meter hingga *span* dengan panjang 36 meter. Analisis kelelahan ini bertujuan untuk mengetahui apakah *span* tersebut dapat bertahan selama umur operasi.

Selanjutnya dipilih 3 *span* yang tidak memenuhi kriteria *screening* yaitu *span* dengan panjang 23 meter, 30 meter, dan 36 meter untuk dilakukan analisis kelelahan yang diakibatkan oleh aliran internal dan eksternal pada pipa bawah laut.

## **4.2 Analisis Aliran Fluida di Luar Pipa**

Pada analisis ini akan disimulasikan fluida di luar pipa dengan menggunakan data lingkungan kurun waktu 100 tahun. Hasil analisis dengan CFD ini akan menghasilkan distribusi *pressure* pada pipa akibat akibat fluida di sekitar pipa sehingga dapat digunakan untuk menentukan tegangan ekivalen dengan menggunakan ANSYS Static Structural.

### **4.2.1 Analisis Metode LOF**

Sebelum dilakukan pemodelan, diperlukan pengecekan arus yang mengenai pipa apakah masih dalam batas aman atau tidak. Pengecekan ini dilakukan dengan menggunakan metode LOF (*Likelihood of Failure*)

**Tabel 4.6** Tipe Bentangan Menurut Metode LOF

<i>Span Length L in metres</i>		<i>Support Arrangement Type</i>
$L \leq$	7.607131509	<i>Stiff</i>
$L >$	7.607131509	<i>Medium Stiff</i>
$L \leq$	10.84026634	
$L >$	10.84026634	<i>Medium</i>
$L \leq$	14.35193948	
$L >$	14.35193948	<i>Flexible</i>

Berdasarkan tabel perhitungan di atas, dapat diketahui jika ketiga *free span* yang ditinjau, memiliki tipe *support* fleksibel. Karena panjang *free span* yang ditinjau lebih dari 14.352 meter. Selanjutnya, melakukan perhitungan nilai vibrasi ( $F_v$ ) berdasarkan Tabel 2.2. Berikut ini adalah hasil perhitungan  $F_v$ .

**Tabel 4.7** Hasil Perhitungan  $F_v$ 

<i>Support Arrangement Type</i>	<i>Range of Outside Diameter (mm)</i>	$F_v$	$\alpha$	$\beta$
<i>Flexible</i>	273 to 762	3600.186	64051.276	-0.905

Selanjutnya menghitung nilai LOF untuk arus yang mengenai pipa.

$$v : 0.7488 \text{ m/s}$$

$$\rho : 1025 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho v^2 : 574.719 \text{ kg.m/s}^2$$

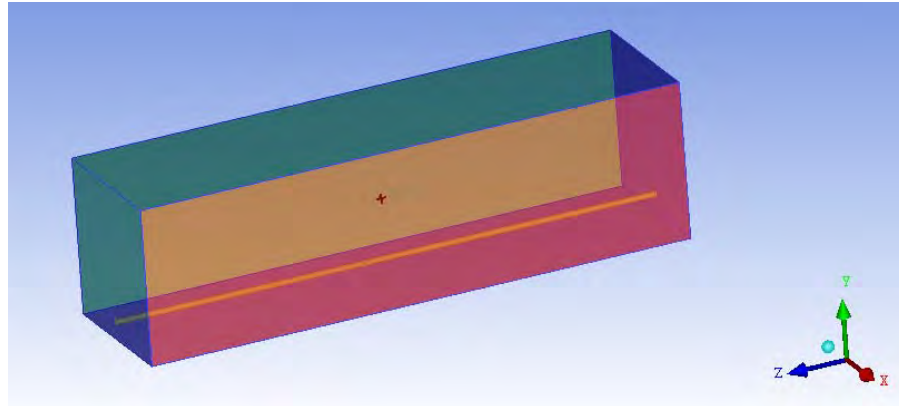
$$\text{LOF} : 0.1596 < 0.5$$

Dari hasil perhitungan di atas, dapat diketahui jika arus yang mengenai pipa masih dalam batas yang diijinkan karena nilai  $\text{LOF} < 0.5$ .

#### 4.2.2 Penggambaran Model

Model yang telah ditentukan dimensinya selanjutnya digambar menjadi gambar tiga dimensi dengan program desain (ICEM CFD). Proses pemodelan dimulai dengan membuat *point* dan kurva, kemudian kurva yang telah dibuat diberi *surface* atau permukaan untuk membuat *meshing* dengan bentuk yang sesuai geometri atau *surface* yang telah dibuat. Dalam pemodelan ini digunakan 3 variasi model yaitu model dengan panjang *span*

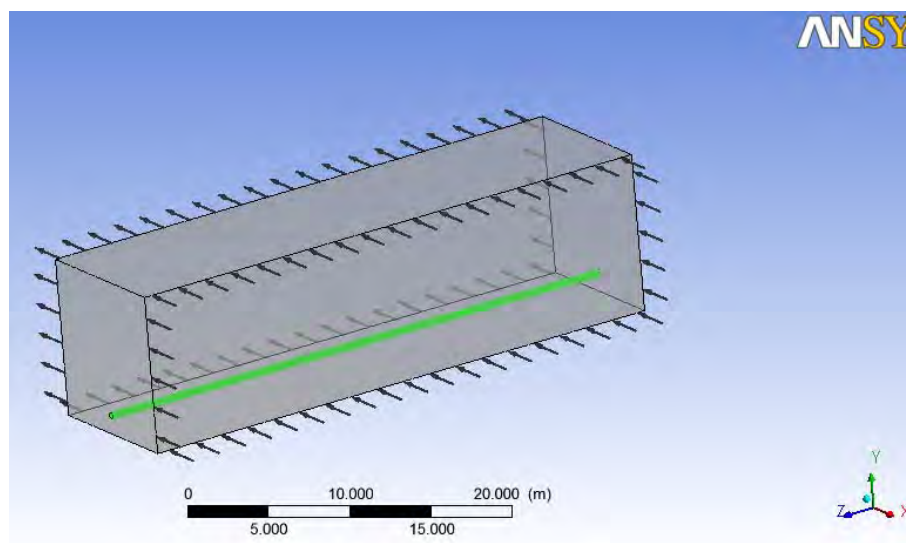
23 meter, 30 meter, dan 36 meter seperti terlihat dalam gambar di bawah ini:



**Gambar 4.3** Pemodelan pada ANSYS CFD dengan *Boundary Condition* untuk Aliran Eksternal

#### 4.2.3 Simulasi

Simulasi dilakukan dengan bantuan *software* CFD. Pada simulasi ini objek atau pipa diletakkan dalam sebuah balok yang berfungsi sebagai pembatas aliran fluida. Aliran massa masuk melalui *inlet* dan keluar menuju *outlet* seperti yang ditunjukkan seperti ditunjukkan pada gambar di bawah. Turbulensi disimulasikan dengan menggunakan parameter  $k-\epsilon$  (epsilon) untuk masing-masing domain.



**Gambar 4.4** *Boundary Condition* untuk Simulasi

*Boundary condition* merupakan kondisi yang menggambarkan karakteristik atau sifat benda dan fluida. Berikut ini adalah *boundary condition* yang digunakan dalam pemodelan:

**Tabel 4.8** *Boundary Condition* untuk Simulasi

Nama	Lokasi	Tipe	Settings
<i>Inlet</i>	<i>Inlet</i>	<i>Inlet</i>	<i>Flow Direction : Normal to boundary condition</i>
			<i>Flow Regime : Subsonic</i>
			<i>Velocity : 0.7488 [m/s]</i>
			<i>Mass and momentum : Normal Speed</i>
<i>Outlet</i>	<i>Outlet</i>	<i>Outlet</i>	<i>Flow Direction : Normal to boundary condition</i>
			<i>Flow Regime : Subsonic</i>
			<i>Velocity : 0.7488 [m/s]</i>
			<i>Mass and momentum : Normal Speed</i>
<i>Wall</i>	<i>Pipa</i>	<i>Wall</i>	<i>Mass and momentum : No slip wall</i>
			<i>Wall Roughness : Smooth wall</i>

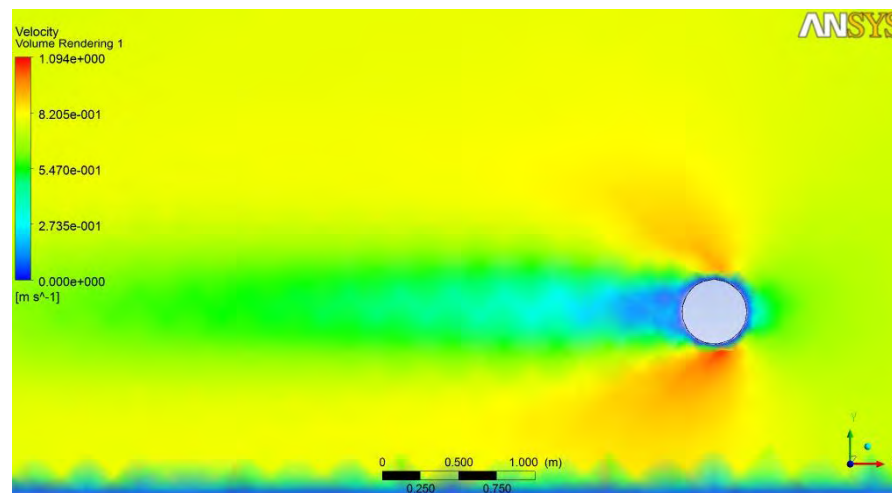
Pada lokasi *inlet* digunakan kecepatan fluida yang merupakan kombinasi antara kecepatan arus dan gelombang yang terjadi di sekitar pipa. Kecepatan arus dan gelombang yang digunakan sesuai dengan data kurun waktu 100 tahun. Pada lokasi *outlet* digunakan parameter input *normal speed* yang sama dengan bagian *inlet* yaitu 0.7488 m/s. *Outlet* ini merupakan bagian dari domain stasioner. Sedangkan untuk *wall* diartikan sebagai dinding pembatas fluida. Pada simulasi ini digunakan *wall* berbentuk balok yang didalamnya terdapat pipa yang merupakan objek dari simulasi. Input dari *wall* adalah *no slip* yang berarti terdapat gesekan pada permukaan.

Setelah selesai mengatur *boundary condition*, langkah selanjutnya adalah penyelesaian simulasi (*solver*). *Solver* yang digunakan untuk pemodelan ini

menggunakan ANSYS CFX. Proses *solver* ini menggunakan iterasi untuk memperoleh solusi penyelesaian simulasi yang diberikan dan ditunjukkan dengan grafik iterasi. *Solver* dikatakan sukses jika terjadi konvergensi. Konvergensi sendiri merupakan kesesuaian antara input simulasi dengan hasil perhitungan yang diperoleh. Semakin kecil selisih konvergensi maka hasil yang diperoleh semakin akurat.

#### 4.2.4 Analisis Data dari Hasil Simulasi

Hasil simulasi yang diperoleh dari *solver* berupa data fluida serta objek simulasi. Pada analisis ini dihasilkan pola aliran fluida yang berada di sekitar pipa terlihat pada gambar di bawah ini:



**Gambar 4.5** Hasil Analisis Aliran Fluida di Luar Pipa dengan ANSYS CFX

Hasil dari simulasi aliran tersebut menunjukkan bahwa kecepatan fluida yang melewati pipa mengalami kenaikan daripada fluida di sekitarnya. Hal tersebut dapat dilihat dari warna kontur kecepatan pada gambar di atas. Pada hasil analisis tersebut juga dapat dilihat adanya pelepasan *vortex* yang terjadi di belakang pipa. Pelepasan *vortex* yang terjadi pada hasil analisis tersebut tidak terlalu terlihat (kecil) karena kecepatan arus yang mengenai *free span* tersebut tidak terlalu besar. Apabila kecepatan arus yang mengenai

*free span* tersebut ditambah, maka pelepasan *vortex* yang terjadi akan lebih terlihat.

Fenomena *vortex* tersebut dapat menimbulkan gaya tersendiri pada *free span*. Gaya yang diakibatkan oleh *vortex* tersebut menimbulkan tekanan (*pressure*). Hasil tekanan pada *free span* dalam simulasi ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

**Tabel 4.9** Hasil Analisis Fluida di Luar Pipa

Kecepatan (m/s)	Re	St	Frekuensi <i>Vortex Shedding</i> (Hz)	Gaya Drag (N)		Selisih (%)	<i>Pressure</i> Hasil ANSYS (Pa)
				Manual	ANSYS		
0.7488	2.85E+7	0.2	0.751	4519.8	4687.89	3.585	31.0143

Dari hasil di atas dapat diketahui jika kecepatan yang di inputkan pada *inlet* sebesar 0.7488 m/s, menghasilkan nilai *Reynolds number* sebesar 2.85+7 dan *strouhal number* sebesar 0.2. Dari nilai *strouhal number* tersebut diperoleh nilai frekuensi *vortex shedding* sebesar 0.751 Hz. Kemudian dari hasil pemodelan didapatkan gaya drag sebesar 4687.89 N. Jika dibandingkan dengan perhitungan manual, selisih gaya drag antara hasil pemodelan ANSYS dengan perhitungan manual adalah 3.585 %. Selisih tersebut cukup kecil, sehingga bisa dikatakan model telah tervalidasi. Setelah model tervalidasi, hasil pemodelan aliran eksternal tersebut dapat digunakan.

### 4.3 Analisis Aliran Internal Pipa

Pada analisis aliran internal pipa, aliran fluida yang mengalir divariasikan menjadi 5 variasi *flowrates*. Yaitu 75 MMscfd, 85 MMscfd, 95 MMscfd, 105 MMscfd, dan 120 MMscfd.

#### 4.3.1 Analisis Metode LOF

Sebelum dilakukan pemodelan dengan menggunakan ANSYS Fluent, diperlukan pengecekan variasi *flowrates* apakah masih dalam batas aman atau tidak. Pengecekan ini dilakukan dengan menggunakan metode LOF (*Likelihood of Failure*). Tabel perhitungan yang digunakan sama dengan Tabel 4.6 dan 4.7 di atas.

Selanjutnya menghitung nilai LOF untuk masing masing variasi *flowrates*. Variasi *flowrates* tersebut pertama-tama harus dikonversikan menjadi kecepatan. Berikut ini adalah hasil konversi *flowrates* menjadi kecepatan.

**Tabel 4.10** Konversi *Flowrates* Menjadi Kecepatan

Variasi	<i>Flowrates</i>	Kecepatan
	MMscfd	m/s
1	75	2.4722
2	85	2.8018
3	95	3.1315
4	105	3.4611
5	120	3.9556

Berikut ini adalah perhitungan LOF untuk masing-masing variasi *flowrates*.

- Variasi 1  
v : 2.4722 m/s  
ρ : 85 kg/m<sup>3</sup>  
ρv<sup>2</sup> : 519.5091 Pa  
LOF : 0.1443 < 0.5
- Variasi 2  
v : 2.8018 m/s  
ρ : 85 kg/m<sup>3</sup>  
ρv<sup>2</sup> : 667.2806 Pa

$$\text{LOF} : 0.1853 < 0.5$$

- Variasi 3

$$v : 3.1315 \text{ m/s}$$

$$\rho : 85 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho v^2 : 833.5236 \text{ Pa}$$

$$\text{LOF} : 0.2315 < 0.5$$

- Variasi 4

$$v : 3.4611 \text{ m/s}$$

$$\rho : 85 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho v^2 : 1018.238 \text{ Pa}$$

$$\text{LOF} : 0.2828 < 0.5$$

- Variasi 5

$$v : 3.9556 \text{ m/s}$$

$$\rho : 85 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho v^2 : 1329.943 \text{ Pa}$$

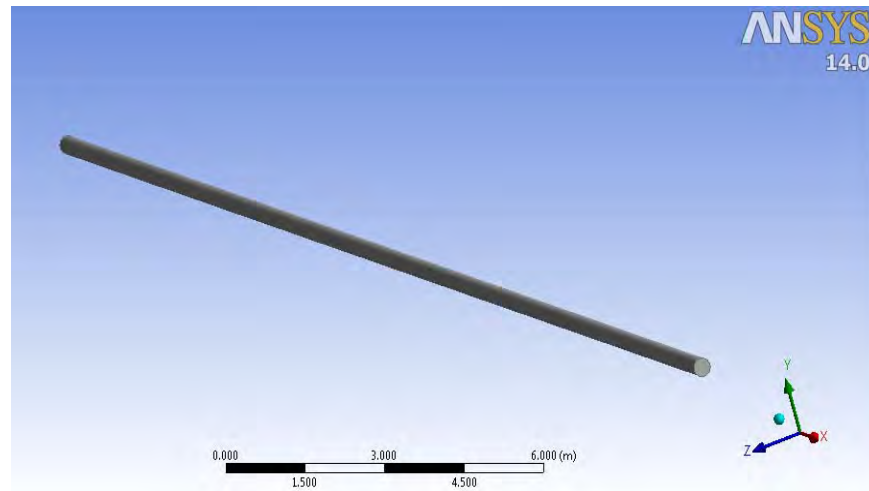
$$\text{LOF} : 0.3694 < 0.5$$

Dari hasil perhitungan di atas, dapat diketahui jika variasi *flowrates* masih dalam batas yang diijinkan karena nilai  $\text{LOF} < 0.5$ .

#### 4.3.2 Pemodelan Aliran Internal

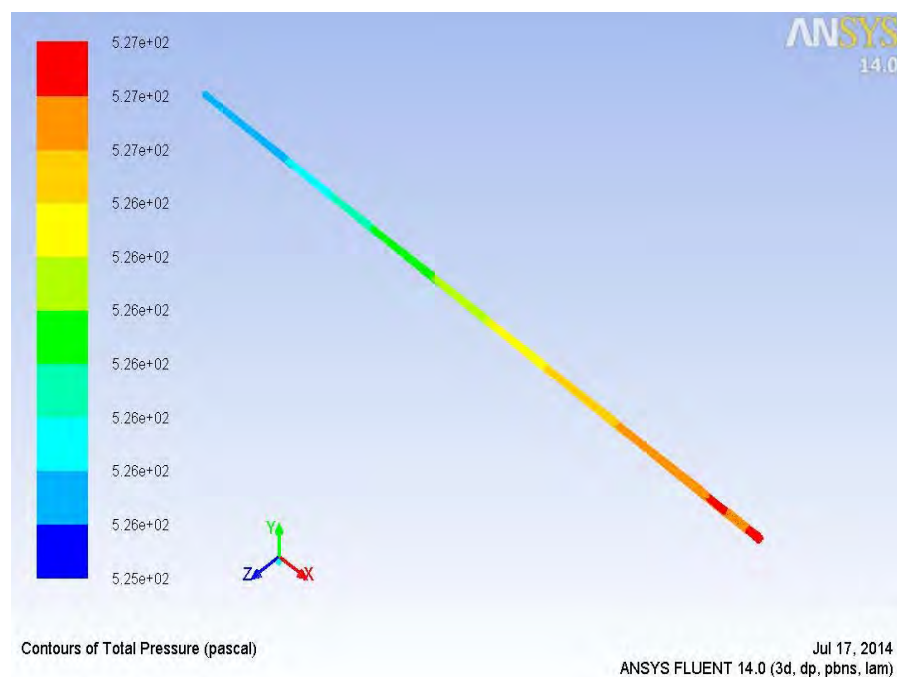
Untuk menganalisis tekanan akibat fluida yang mengalir di dalam *freespan* dilakukan dengan menggunakan bantuan *software* ANSYS CFD. Program ANSYS CFD yang digunakan di sini adalah ANSYS FLUENT. Tahapan pemodelan untuk analisis aliran internal hampir sama dengan pemodelan untuk analisis aliran eksternal. Pertama yaitu penggambaran model pada ANSYS Design Modeler. Model yang digunakan adalah berupa *freespan* lurus dengan *boundary condition inlet*, *outlet* dan *wall*. Berikut ini adalah model untuk analisis aliran internal.



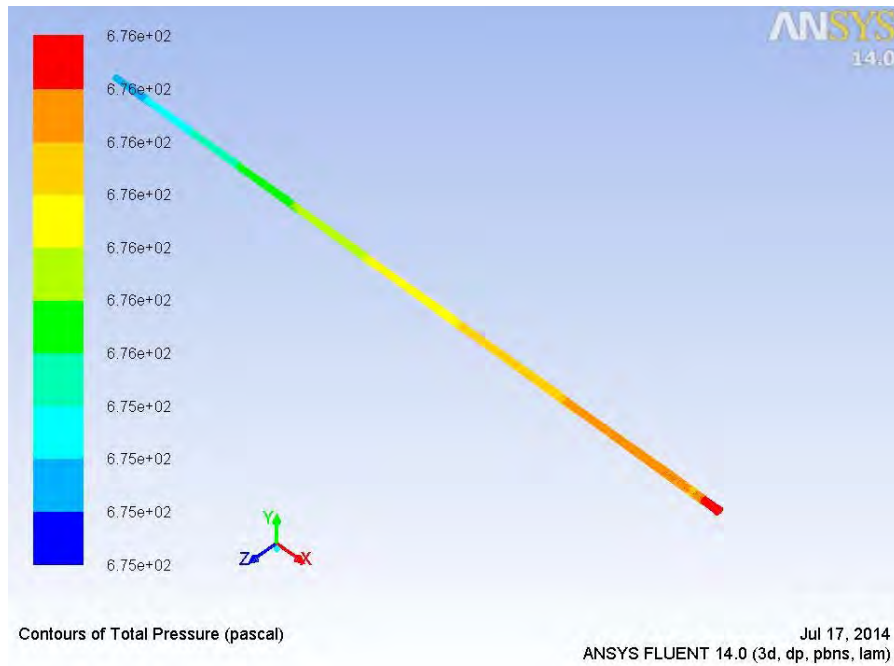


**Gambar 4.6** Pemodelan pada ANSYS Fluent untuk Aliran Internal

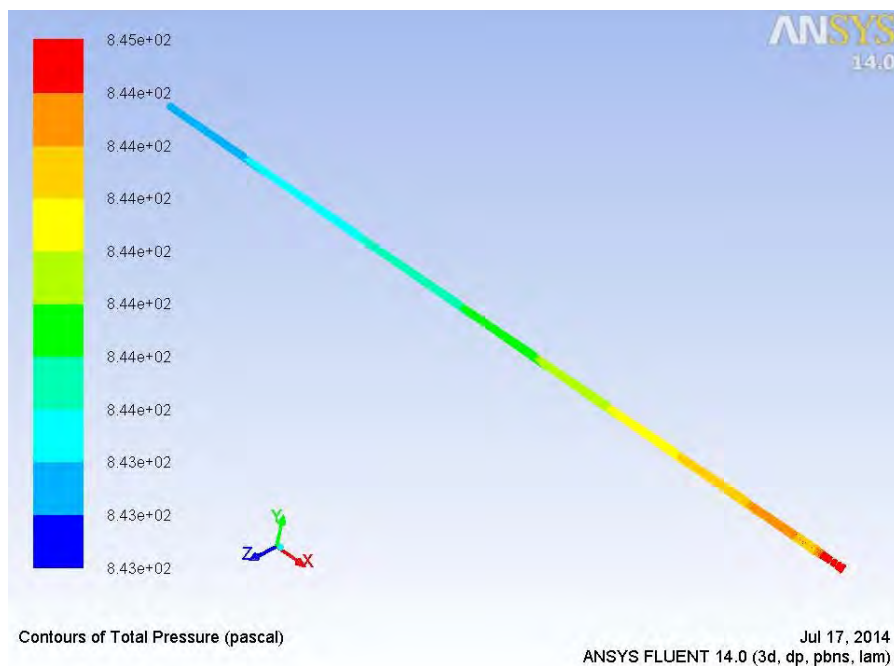
Setelah selesai menggambar model yang akan dianalisis, selanjutnya adalah memasukkan nilai variasi *flowrates* untuk *boundary condition inlet*. Berikut ini adalah hasil simulasi variasi *flowrates* menggunakan ANSYS Fluent.



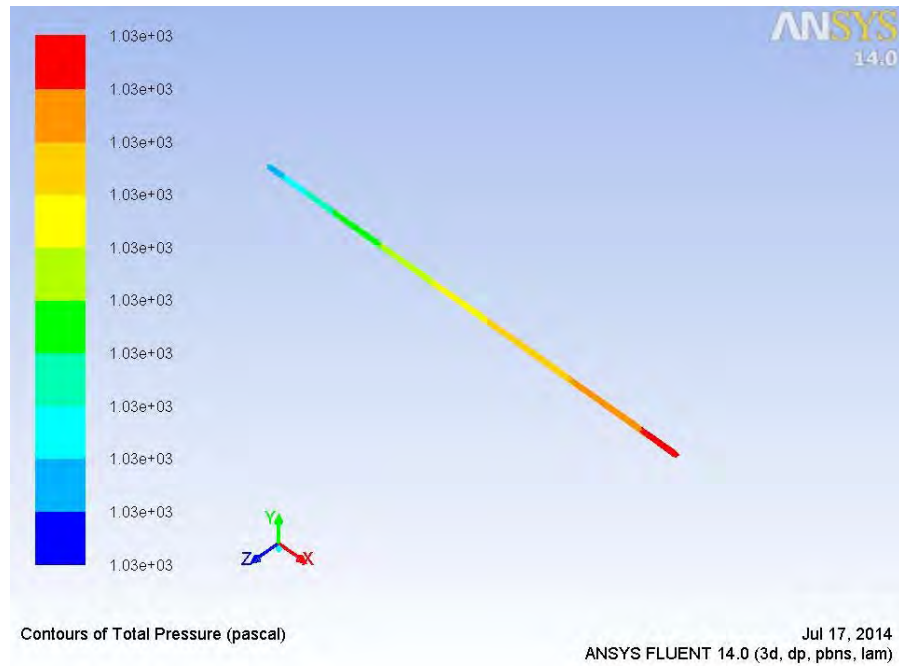
**Gambar 4.7** Hasil Analisis Aliran Fluida Internal dengan *Flowrates* 75 MMscfd



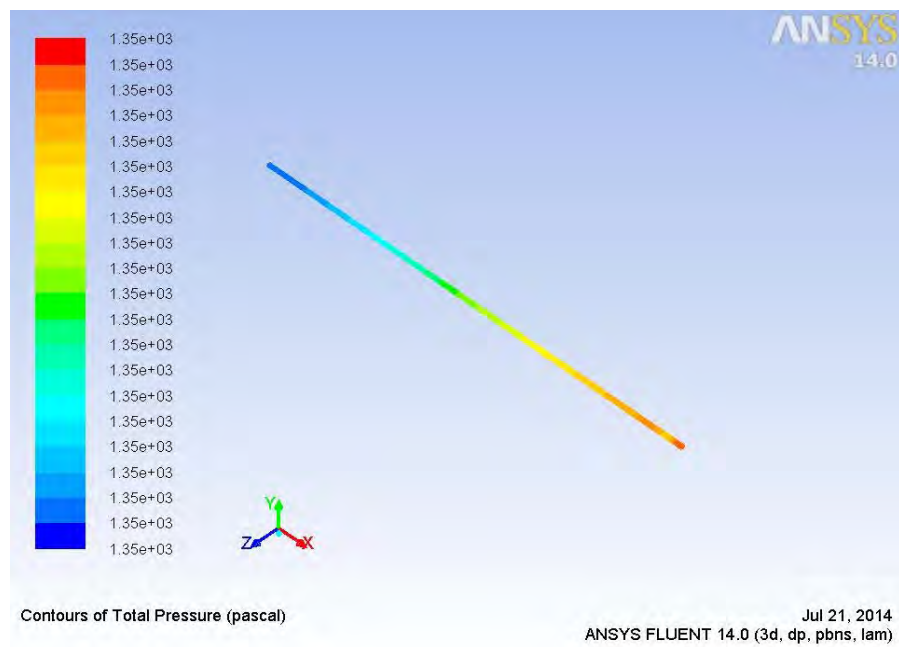
**Gambar 4.8** Hasil Analisis Aliran Fluida Internal dengan *Flowrates* 85 MMscfd



**Gambar 4.9** Hasil Analisis Aliran Fluida Internal dengan *Flowrates* 95 MMscfd



**Gambar 4.10** Hasil Analisis Aliran Fluida Internal dengan *Flowrates* 105 MMscfd



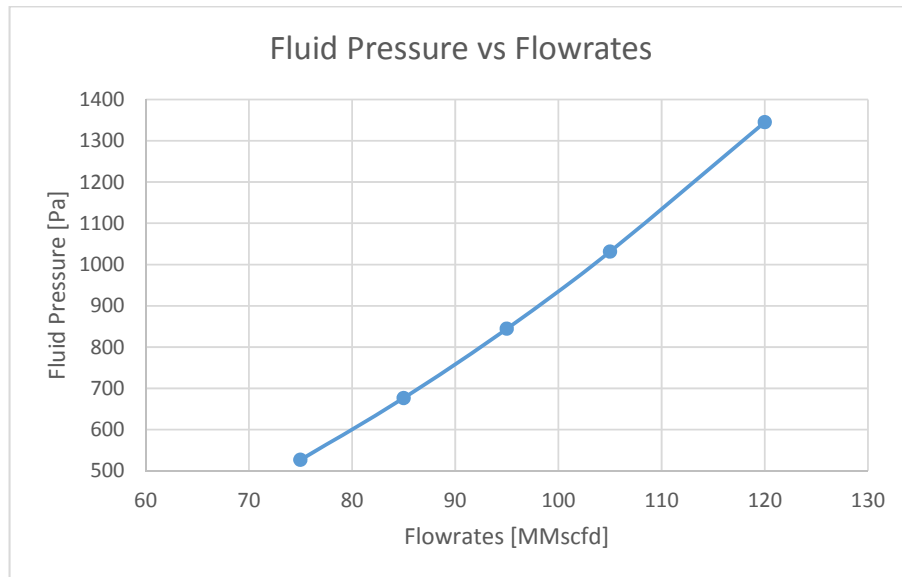
**Gambar 4.11** Hasil Analisis Aliran Fluida Internal dengan *Flowrates* 120 MMscfd

Pada hasil analisis di atas, diperoleh bahwa kenaikan jumlah flowrates sebagai variasi pada *boundary inlet* adalah berbanding lurus dengan besar tekanan (*pressure*) yang ditimbulkan oleh fluida itu sendiri. Sehingga semakin besar *flowrates* fluida yang mengalir di dalam pipa, tekanan yang ditimbulkan.

**Tabel 4.11** Perbandingan Tekanan Fluida Hasil ANSYS dengan Metode LOF

<i>Flowrates</i> (MMscfd)	<i>Fluid Pressure</i> (ANSYS FLUENT) (Pa)	$\rho v^2$ (Pa)	% Selisih
75	526.7807	519.5091	1.3804
85	676.6875	667.2806	1.3464
95	844.5118	833.5236	1.3011
105	1031.355	1018.238	1.2718
120	1345.006	1329.943	1.1199

Dari Tabel 4.11, dapat diketahui untuk *flowrates* dengan nilai 75 MMscfd menghasilkan tekanan 536.7807 Pa. Dan tekanan fluida di dalam pipa yang paling besar terjadi pada *flowrates* dengan nilai 120 MMscfd yang menghasilkan tekanan pada dinding pipa sebesar 1345.006 Pa. Selain itu hasil dari pemodelan menggunakan ANSYS dan perhitungan manual menggunakan metode LOF selisihnya tidak terlalu besar yaitu kurang dari 5%. Sehingga hasil dari pemodelan dengan menggunakan ANSYS Fluent valid atau dapat digunakan untuk digunakan dalam analisis selanjutnya.



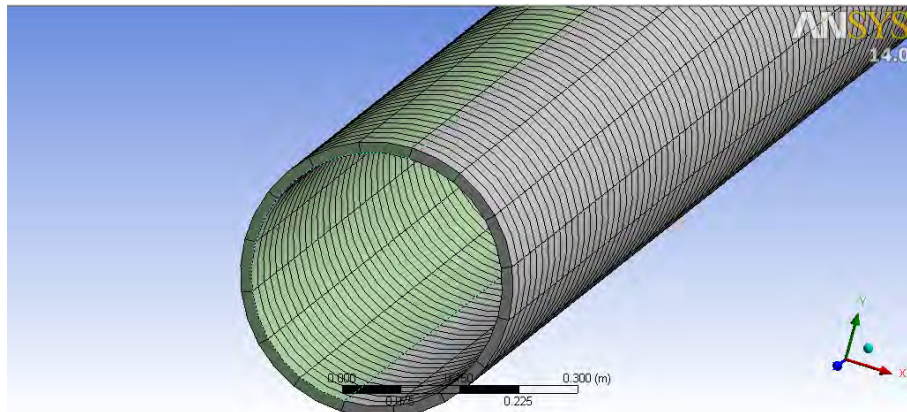
**Gambar 4.12** Grafik Hubungan Tekanan Fluida dengan *Flowrates*

#### 4.4 Analisis Tegangan Pipa Dengan ANSYS Static Structural

Pemodelan menggunakan ANSYS Static Structural dilakukan dengan memodelkan 3 buah *freespan* yang masing-masing memiliki panjang 23 meter, 30 meter, dan 36 meter. Tujuan utama dari pemodelan menggunakan ANSYS Static Structural adalah untuk mendapatkan tegangan ekuivalen atau tegangan von mises yang kemudian akan digunakan untuk mencari umur kelelahan dari bentangan *freespan* itu sendiri.

##### 4.4.1 Penggambaran Model dan Pembebanan

Pemodelan pipa dilakukan berdasarkan data yang diperoleh dari SANTOS, yaitu dengan massa jenis  $7850 \text{ kg/m}^3$ , poisson rasio 0.3, serta memiliki modulus young  $2.07\text{E}+11$ . Setelah pemodelan selesai dilakukan, kemudian dilakukan proses *meshing*. Untuk mendapatkan hasil yang akurat, maka seluruh area pipa dilakukan *meshing* lebih rapat.

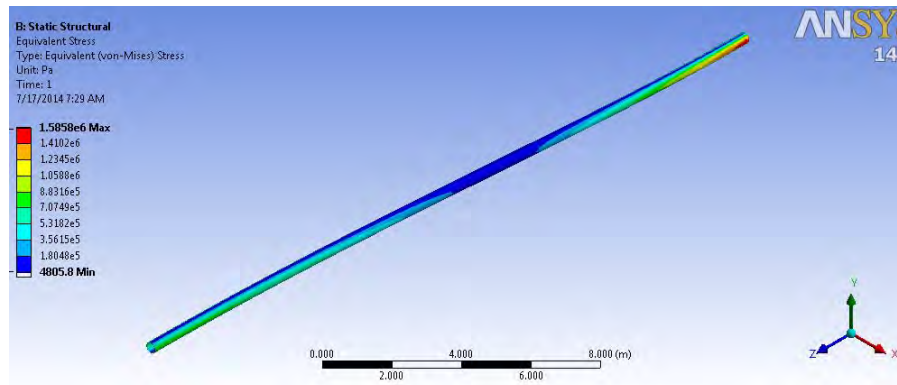


**Gambar 4.13** Meshing Pada Struktur Pipa

Setelah proses *meshing* selesai, kemudian dilakukan input pembebanan pada pipa. Pembebanan pada pipa berupa tekanan (*pressure*) yang diakibatkan oleh aliran internal fluida dan eksternal (arus) yang bekerja pada pipa. Nilai tekanan tersebut diperoleh dari hasil pemodelan yang telah dilakukan sebelumnya. Selain itu, ujung pada pipa tumpuannya dimodelkan sebagai *pin* dan ujung lainnya dimodelkan sebagai *roll*. Tumpuan dimodelkan sebagai *pin* dan *roll* dikarenakan jenis tumpuan tersebut paling mendekati kondisi sebenarnya untuk *fre-span* yang terjadi pada pipa bawah laut.

#### **4.4.2 Analisis Hasil Pemodelan**

Setelah dilakukan proses *running* terhadap model yang dibuat, dihasilkan output berupa tegangan di *fre-span*. Tegangan tersebut nantinya digunakan untuk menghitung umur kelelahan pada *fre-span*. Berikut ini adalah distribusi tegangan pada *fre-span* pipa bawah laut.



**Gambar 4.14** Distribusi Tegangan pada *Freespan*

Dari Gambar 4.14, dapat diketahui distribusi tegangan pada pipa, tegangan yang paling besar terjadi pada ujung yang dimodelkan dengan tumpuan pin, sedangkan tegangan yang paling kecil terjadi pada bagian tengah pipa. Berikut adalah hasil dari pemodelan *freespan* pipa bawah laut pada ANSYS Static Structural.

**Tabel 4.12** Hasil Pemodelan *Freespan* pada ANSYS Static Structural dengan Pembebanan *Flowrates*

Panjang <i>Span</i> (m)	<i>Flowrates</i> (MMSCFD)	<i>Pressure</i>	Tegangan (Pa)
23, 30, 36	75	519.5091	10936
	85	667.2806	14042
	95	833.5236	17532
	105	1018.238	21411
	120	1329.943	27923

**Tabel 4.13** Hasil Pemodelan *Freespan* pada ANSYS Static Structural dengan Pembebanan Arus

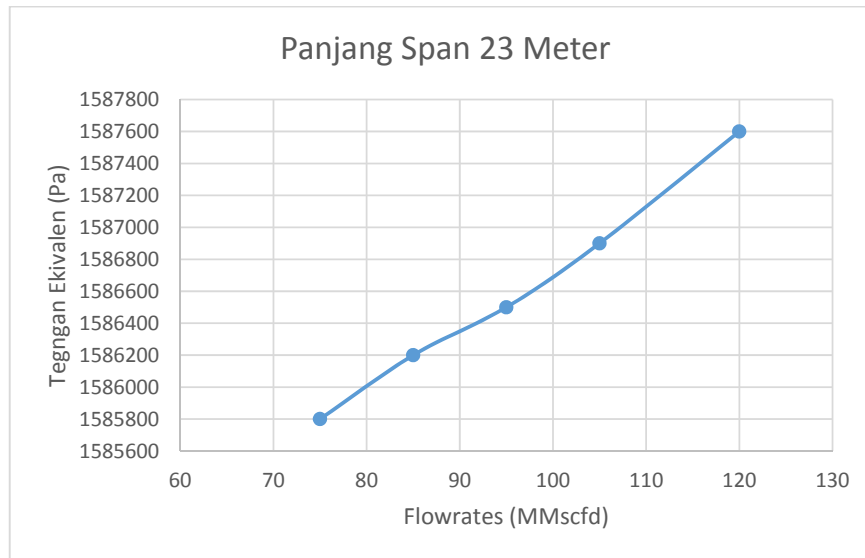
Panjang Span (m)	Kecepatan Arus (m/s)	Pressure (Pa)	Tegangan (Pa)
23	0.7488	31.0143	1584800
30	0.7488	31.0143	2680100
36	0.7488	31.0143	3843500

**Tabel 4.14** Hasil Pemodelan *Freespan* pada ANSYS Static Structural dengan Kombinasi Pembebanan Arus dan *Flowrates*

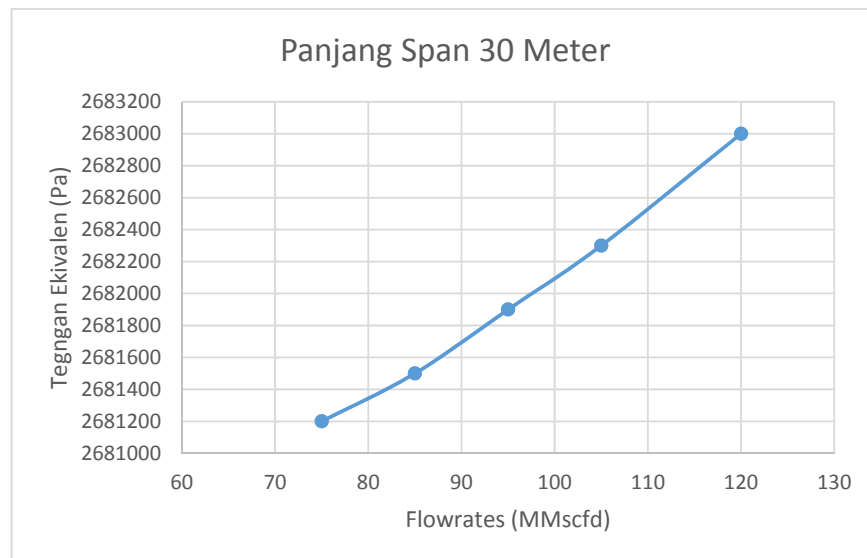
Panjang Span (m)	Kecepatan Arus (m/s)	Flowrates (MMscfd)	Tegangan (Pa)
23	0.7488	75	1585800
		85	1586200
		95	1586500
		105	1586900
		120	1587600
30	0.7488	75	2681200
		85	2681500
		95	2681900
		105	2682300
		120	2683000
36	0.7488	75	3844600
		85	3844900
		95	3845300
		105	3845700
		120	3846400

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, dapat diketahui nilai tegangan yang terjadi pada *freespan*, untuk lebih mudahnya memahami hasil perhitungan tersebut dapat dilihat pada grafik di bawah ini.

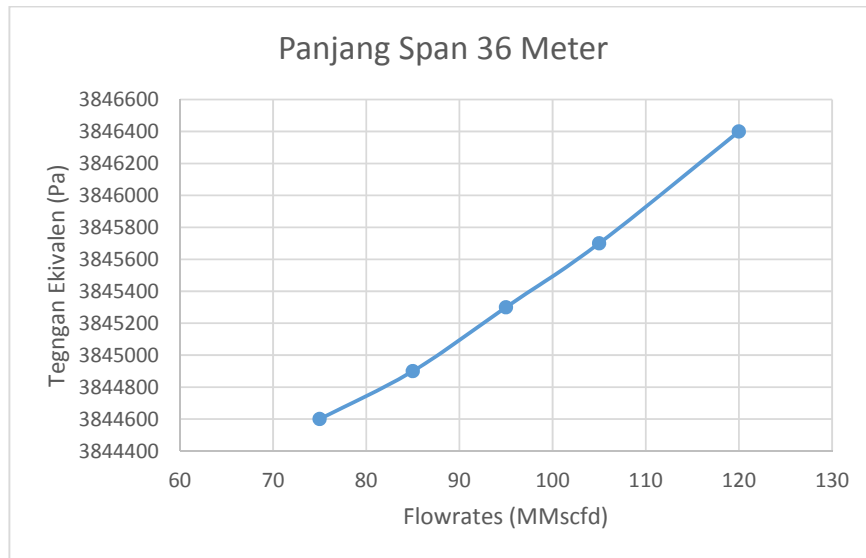




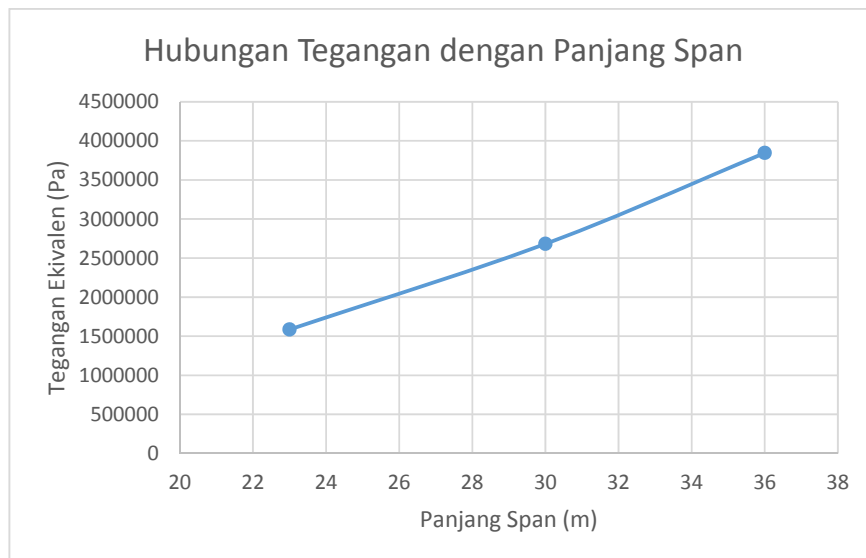
**Gambar 4.15** Grafik Hubungan Antara Tegangan dan *Flowrates* pada *Span* 23 Meter dan Arus 0.7488 m/s



**Gambar 4.16** Grafik Hubungan Antara Tegangan dan *Flowrates* pada *Span* 30 Meter dan Arus 0.7488 m/s



**Gambar 4.17** Grafik Hubungan Antara Tegangan dan *Flowrates* pada *Span* 36 Meter dan Arus 0.7488 m/s



**Gambar 4.18** Grafik Hubungan Antara Tegangan dan Panjang *Span* pada 75 MMscfd dan Arus 0.7488 m/s

Berdasarkan Gambar 4.15, 4.16, dan 4.17 dapat diketahui bahwa semakin besar *flowrates* fluida yang mengalir di dalam pipa, maka tegangan yang dialami pipa juga akan semakin besar. Misalnya, pada *span* dengan panjang

23 meter, ketika *flowrates* yang digunakan 75 MMscfd dan kecepatan arus yang mengenai pipa 0.7488 m/s, tegangan ekuivalen yang dihasilkan mencapai 1.5858 MPa. Ketika *flowrates* dinaikkan menjadi 85 MMscfd, tegangan ekuivalen yang dihasilkan mencapai 1.5862 MPa, terjadi kenaikan tegangan ekuivalen sebesar 0.0004 MPa. Selain itu, semakin panjang *freespan* yang terjadi, maka tegangan pada *freespan* tersebut juga semakin besar, hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.18.

#### 4.5 Analisis Umur Kelelahan

Pada *freesan* pipa bawah laut, penyebab utama kelelahan diakibatkan oleh adanya *vortex induced vibration*. Untuk menghitung umur kelelahan pada *freespan* pipa bawah laut digunakan hukum Palmgreen-Miner dan kurva S-N. Asumsi yang dipakai dalam analisis kelelahan ini adalah sebagai berikut:

- *Span* telah terjadi selama 20 tahun.
- Pipa dilas berbentuk simetris dengan pengelasan root kurva F1. Pemilihan kurva F1 ini dikarenakan dalam DNV RP C-203 klasifikasi pengelasan yang sering digunakan dalam *pipeline* dan *risers* adalah tipe F1. Untuk data-data kurva F1 dapat dilihat dalam Tabel 2.3. Dalam Tabel 2.3 tersebut diketahui nilai:

$$\text{Log } A = 11.222$$

$$A = 1.67\text{E}+11$$

$$m = 3$$

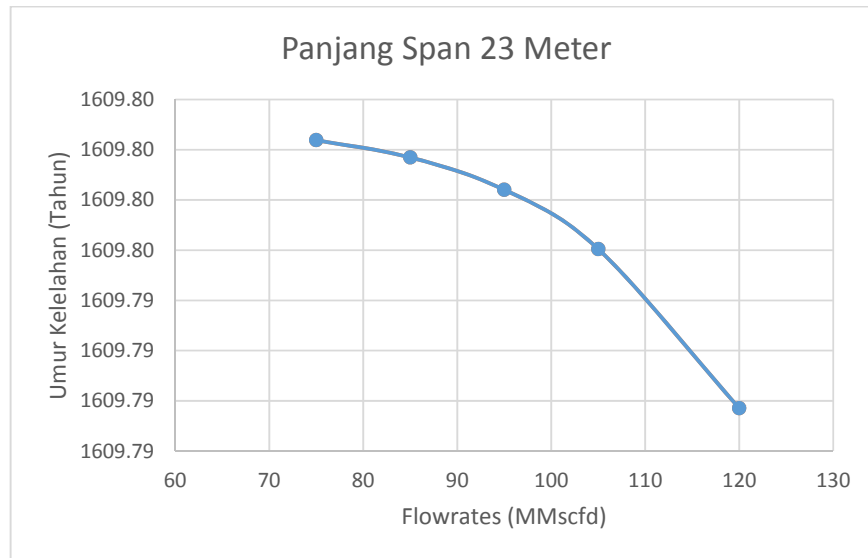
$$\text{SCF} = 1$$

Langkah pengerjaan umur kelelahan untuk pipa bawah laut karena beban akibat *flowrates* fluida dalam pipa dan beban eksternal akibat arus adalah dengan mengkombinasikan kerusakan akibat kedua aliran tersebut. Berikut ini adalah hasil perhitungan umur kelelahannya.

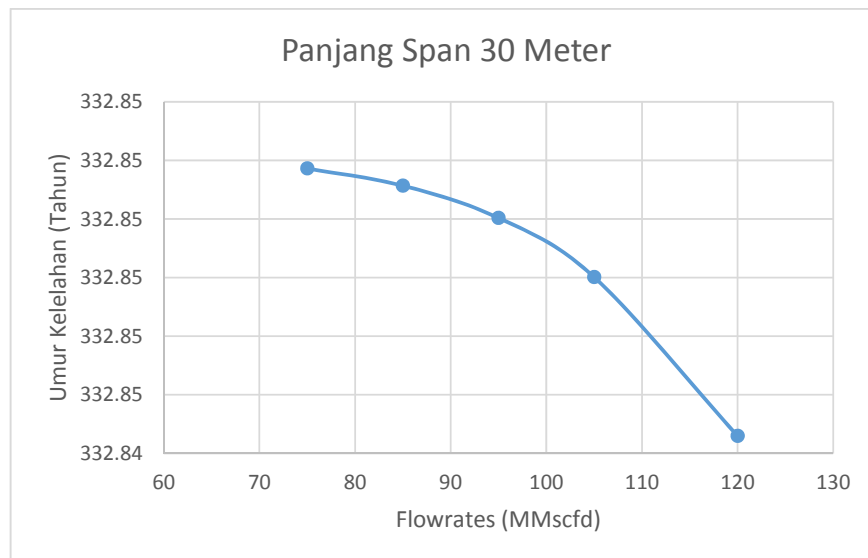
**Tabel 4.15** Hasil Perhitungan Umur Kelelahan

Panjang Span (m)	Kecepatan Arus (m/s)	Flowrates (MMscfd)	Tegangan (Mpa)	T <sub>life</sub> (tahun)
23	0.7488	75	1.5858	1609.800383
		85	1.5862	1609.799693
		95	1.5865	1609.798407
		105	1.5869	1609.796045
		120	1.5876	1609.789707
30	0.7488	75	2.6812	332.845386
		85	2.6815	332.845357
		95	2.6819	332.845302
		105	2.6823	332.845201
		120	2.683	332.844930
36	0.7488	75	3.8446	112.853475
		85	3.8449	112.853469
		95	3.8453	112.853459
		105	3.8457	112.853445
		120	3.8464	112.853414

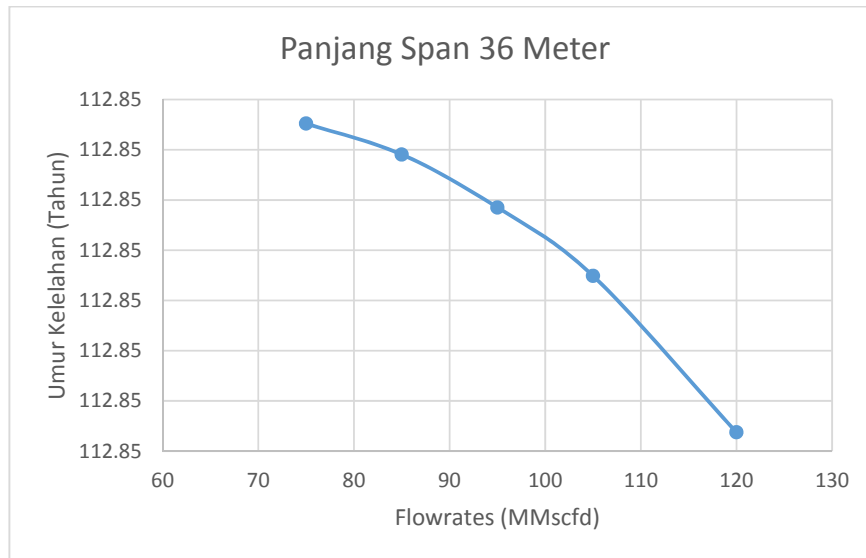
Dari tabel di atas dapat diketahui umur *freespan* untuk masing masing panjang *span* dengan variasi *flowrates*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada grafik di bawah ini.



**Gambar 4.19** Grafik Hubungan Antara Umur Kelelahan dan Flowrates pada *Span* 23 Meter



**Gambar 4.20** Grafik Hubungan Antara Umur Kelelahan dan Flowrates pada *Span* 30 Meter



**Gambar 4.21** Grafik Hubungan Antara Umur Kelelahan dan Flowrates pada *Span* 36 Meter

Berdasarkan hasil terlihat jika umur kelelahan *freespan* mengalami penurunan sering dengan meningkatnya *flowrates* aliran internal fluida dalam pipa. Tetapi penurunan umur kelelahan yang diakibatkan oleh adanya variasi *flowrates* aliran internal fluida di dalam pipa tidak signifikan. Sehingga pengaruh akibat aliran internal fluida di dalam pipa dapat diabaikan. Sedangkan dengan variasi panjang *span*, penurunan umur kelelahan yang terjadi cukup besar. Semakin panjang *freespan* yang terjadi, umur kelelahan pipa semakin kecil

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Setelah dilakukan perhitungan, simulasi, dan analisis data maka dapat ditarik kesimpulan bahwa:

1. Perhitungan kriteria *screening* kelelahan menggunakan DNV RP F-105 dan menghasilkan panjang *span* dengan panjang mulai 13 meter tidak memenuhi kriteria *screening* kelelahan sehingga harus dilakukan analisis kelelahan lebih lanjut.
2. Pengaruh peningkatan *flowrates* terhadap tegangan yang dialami oleh pipa yaitu semakin besar *flowrates* fluida yang mengalir di dalam pipa, tegangan yang dialami pipa juga semakin besar.
3. Semakin besar peningkatan *flowrates* umur kelelahan pipa semakin kecil. Pengaruh *flowrates* fluida dalam pipa pada umur kelelahan pipa sangat kecil, sehingga dapat diabaikan. Sedangkan pengaruh panjang *freespan* pada penurunan umur kelelahan pada pipa cukup besar.

#### **5.2 Saran**

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian lebih lanjut mengenai tugas akhir ini adalah:

1. Perlunya dilakukan analisis lebih lanjut untuk melakukan analisis fenomena *lock in* (resonansi).
2. Perlunya dilakukan analisis lebih lanjut terhadap aliran internal dan eksternal fluida pada pipa jika pada pipa terdapat *dent* atau penyok.
3. Perlu dilakukan percobaan langsung di laboratorium untuk mengetahui pengaruh *flowrates* secara lebih akurat terhadap umur kelelahan.
4. Perlu dilakukan analisis umur kelelahan jika terjadi beban gempa.
5. Perlu dilakukan analisis lebih lanjut jika kontur batimetri dasar laut tidak rata.
6. Perlu dilakukan pemodelan VIV pada *freespan*.

(HALAMAN SENGAJA DIKOSONGKAN)

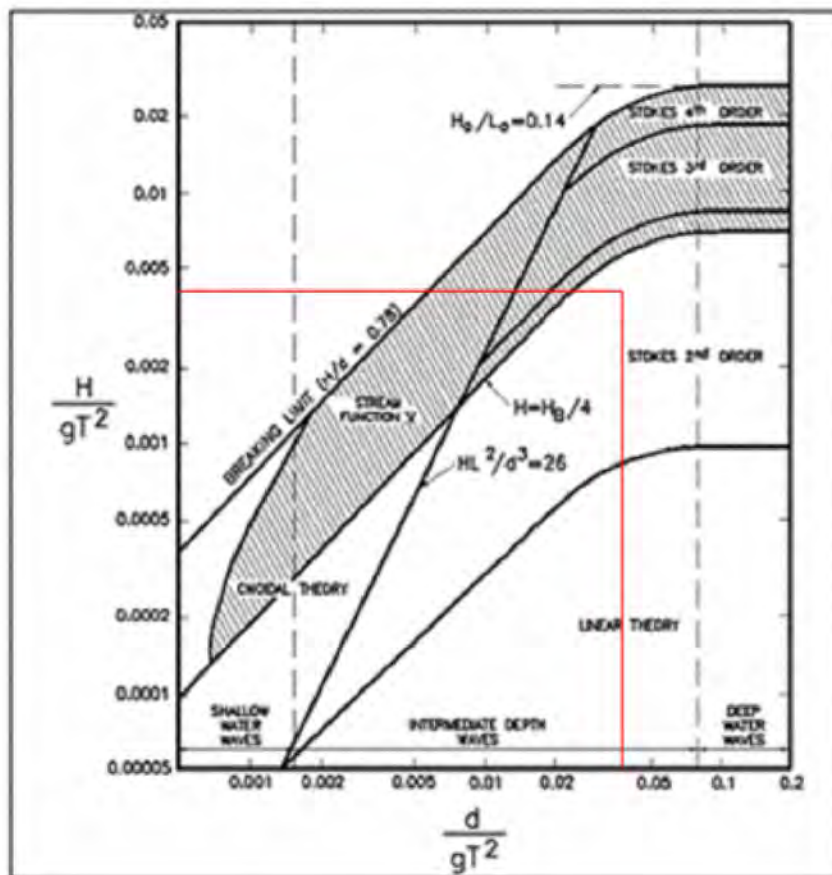


**LAMPIRAN A**  
**Penentuan Teori Gelombang**

Tinggi Gelombang (H) = 5.83 meter  
 Periode Gelombang (T) = 11.71 meter  
 Perc. Gravitasi (g) = 9.81 m/s<sup>2</sup>  
 Kedalaman (d)

$$\frac{H}{gT^2} = \frac{5.83}{9.81 \times 11.71^2} = 0.004434$$

$$\frac{d}{gT^2} = \frac{55}{9.81 \times 11.71^2} = 0.04086$$

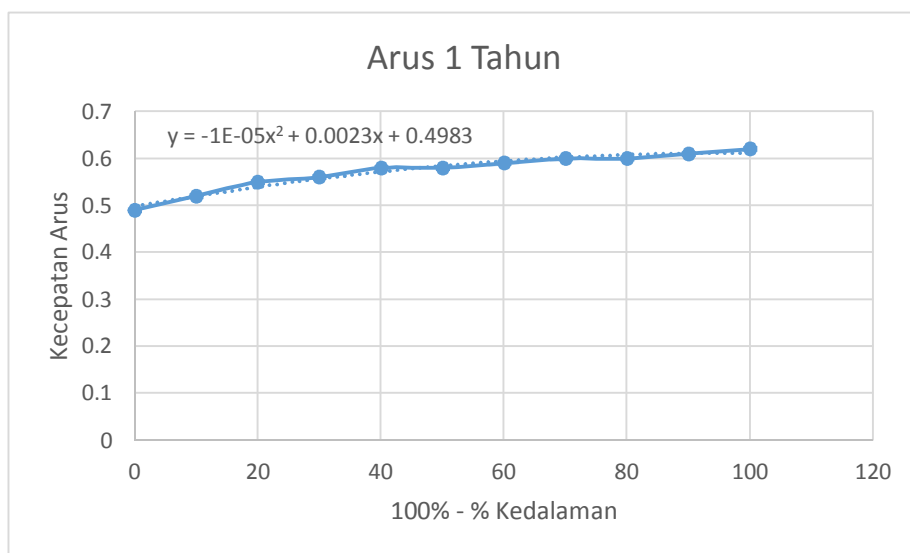


Berdasarkan grafik *region of validity* di atas, teori gelombang yang cocok digunakan dalam analisis ini adalah Stokes Orde 2.

**LAMPIRAN B**  
**Penentuan Persamaan untuk Perhitungan Arus**

- Untuk Arus dengan Periode Ulang 1 Tahun

Arus 1 Tahun	
100% - % Kedalaman	Kecepatan Arus (m/s)
100	0.62
90	0.61
80	0.6
70	0.6
60	0.59
50	0.58
40	0.58
30	0.56
20	0.55
10	0.52
0	0.49



Persamaan :  $y = -10^{-5}x^2 + 0.0023x + 0.4983$

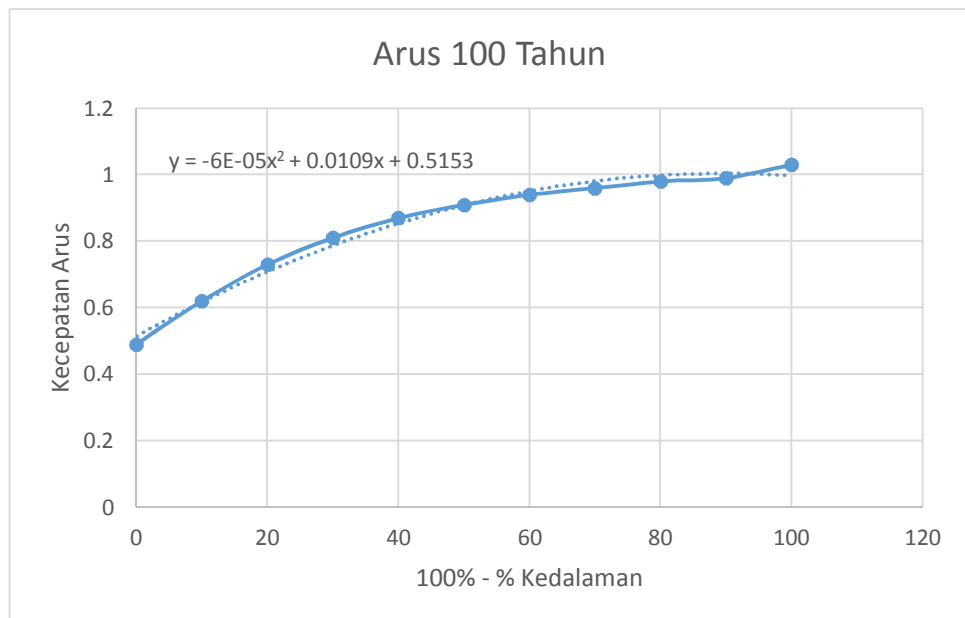
dengan

y = Kecepatan Arus

x = 100% - % Kedalaman

- Untuk Arus dengan Periode Ulang 100 Tahun

Arus 100 Tahun	
100% - % Kedalaman	Kecepatan Arus (m/s)
100	1.03
90	0.99
80	0.98
70	0.96
60	0.94
50	0.91
40	0.87
30	0.81
20	0.73
10	0.62
0	0.49



Persamaan :  $y = -6 \times 10^{-6}x^2 + 0.0023x + 0.4983$

dengan

y = Kecepatan Arus

x = 100% - % Kedalaman

**LAMPIRAN C**  
**Konversi *Flowrates* Menjadi Kecepatan**

$$1 \text{ MMscfd} = 20.32 \frac{\text{ton}}{\text{day}} (60^\circ\text{F}, 14.7 \text{ psig})$$

$$1 \text{ MMscfd} = 20320 \frac{\text{kg}}{\text{day}} (60^\circ\text{F}, 14.7 \text{ psig})$$

$$1 \text{ MMscfd} = \frac{20320 \frac{\text{kg}}{\text{day}}}{85 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 239.0588 \frac{\text{m}^3}{\text{day}} (60^\circ\text{F}, 1500 \text{ psig})$$

- Variasi 1 (*Flowrates* 75 MMscfd)

$$75 \text{ MMscfd} = 75 \times 239.0588 = 17929.41 \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

$$17929.41 \frac{\text{m}^3}{\text{day}} = \frac{17929.41 \frac{\text{m}^3}{\text{day}}}{86400 \frac{\text{s}}{\text{day}}} = 0.2075 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$0.2075 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = \frac{0.2075 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{A_{int}} = \frac{0.2075 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.0839 \text{ m}^2} = 2.4722 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Untuk *flowrates* lainnya diperlihatkan pada tabel di bawah ini.

Tabel Perhitungan Konversi *Flowrates*

Variasi	<i>Flowrates</i>			<i>Velocity</i>
	MMscfd	m <sup>3</sup> /day	m <sup>3</sup> /s	m/s
1	75	17929.41	0.207516	2.4722
2	85	20320.00	0.235185	2.8018
3	95	22710.59	0.262854	3.1315
4	105	25101.18	0.290523	3.4611
5	120	28687.06	0.332026	3.9556

**LAMPIRAN D**  
**Perhitungan *Screening* Kriteria Kelelahan**



L (m)	$\beta$		$L_{eff}$ (m)		Critical Buckling Load ( $P_{cr}$ ) (N)		Static Deflection ( $\delta$ ) (m)		Natural Frequency (Hz)		Kriteria Screening		Hasil Screening ( $f_n >$ kriteria screening)
	In-Line	Cross-Flow	In-Line	Cross-Flow	In-Line	Cross-Flow	In-Line	Cross-Flow	In-Line	Cross-Flow	In-Line	Cross-Flow	
2	0.098	0.285	8.9238	8.0388	5.74E+06	7.07E+06	2.21E-04	1.06E-03	6.9034	8.4959	1.9063	0.7065	Memenuhi
3	0.802	0.989	9.3814	8.6590	5.19E+06	6.09E+06	2.69E-04	1.42E-03	6.2510	7.3293	1.8880	0.7065	Memenuhi
4	1.302	1.489	10.1979	9.5161	4.39E+06	5.04E+06	3.75E-04	2.07E-03	5.2974	6.0766	1.8697	0.7065	Memenuhi
5	1.690	1.877	11.0851	10.4110	3.72E+06	4.21E+06	5.21E-04	2.96E-03	4.4907	5.0848	1.8514	0.7065	Memenuhi
6	2.006	2.194	11.9805	11.3011	3.18E+06	3.58E+06	7.09E-04	4.09E-03	3.8514	4.3226	1.8331	0.7065	Memenuhi
7	2.274	2.461	12.8660	12.1751	2.76E+06	3.08E+06	9.39E-04	5.49E-03	3.3458	3.7310	1.8148	0.7065	Memenuhi
8	2.506	2.693	13.7356	13.0302	2.42E+06	2.69E+06	1.22E-03	7.18E-03	2.9414	3.2636	1.7965	0.7065	Memenuhi
9	2.711	2.898	14.6288	14.0422	2.13E+06	2.32E+06	1.56E-03	9.64E-03	2.5988	2.8170	1.7782	0.7065	Memenuhi
10	2.894	3.081	15.6157	15.0347	1.87E+06	2.02E+06	2.01E-03	1.26E-02	2.2865	2.4637	1.7599	0.7065	Memenuhi
11	3.059	3.246	16.6080	16.0300	1.66E+06	1.78E+06	2.56E-03	1.62E-02	2.0269	2.1734	1.7416	0.7065	Memenuhi
12	3.211	3.398	17.6030	17.0262	1.47E+06	1.58E+06	3.21E-03	2.05E-02	1.8094	1.9325	1.7233	0.7065	Memenuhi
13	3.350	3.537	18.5991	18.0224	1.32E+06	1.41E+06	3.98E-03	2.56E-02	1.6257	1.7307	1.7050	0.7065	Tidak Memenuhi
14	3.478	3.665	19.5953	19.0178	1.19E+06	1.26E+06	4.87E-03	3.15E-02	1.4692	1.5601	1.6867	0.7065	Tidak Memenuhi
15	3.598	3.785	20.5912	20.0124	1.08E+06	1.14E+06	5.90E-03	3.84E-02	1.3350	1.4148	1.6684	0.7065	Tidak Memenuhi
16	3.710	3.897	21.5863	21.0058	9.80E+05	1.04E+06	7.08E-03	4.63E-02	1.2190	1.2902	1.6501	0.7065	Tidak Memenuhi
17	3.816	4.003	22.5805	21.9980	8.96E+05	9.44E+05	8.42E-03	5.54E-02	1.1180	1.1827	1.6318	0.7065	Tidak Memenuhi
18	3.915	4.102	23.5737	22.9891	8.22E+05	8.64E+05	9.92E-03	6.55E-02	1.0297	1.0895	1.6135	0.7065	Tidak Memenuhi
21	4.183	4.370	26.5469	25.9557	6.48E+05	6.78E+05	1.56E-02	1.04E-01	0.8218	0.8754	1.5586	0.7065	Tidak Memenuhi
23	4.341	4.528	28.5241	27.9286	5.61E+05	5.86E+05	2.04E-02	1.37E-01	0.7181	0.7735	1.5219	0.7065	Tidak Memenuhi
24	4.415	4.602	29.5113	28.9138	5.25E+05	5.46E+05	2.32E-02	1.56E-01	0.6740	0.7318	1.5036	0.7065	Tidak Memenuhi
25	4.486	4.673	30.4977	29.8982	4.91E+05	5.11E+05	2.62E-02	1.77E-01	0.6341	0.6955	1.4853	0.7065	Tidak Memenuhi
26	4.554	4.741	31.4834	30.8820	4.61E+05	4.79E+05	2.95E-02	2.00E-01	0.5980	0.6640	1.4670	0.7065	Tidak Memenuhi
27	4.619	4.806	32.4683	31.8653	4.33E+05	4.50E+05	3.31E-02	2.24E-01	0.5652	0.6367	1.4487	0.7065	Tidak Memenuhi
30	4.802	4.989	35.4197	34.8121	3.64E+05	3.77E+05	4.55E-02	3.10E-01	0.4827	0.5772	1.3938	0.7065	Tidak Memenuhi
31	4.859	5.046	36.4024	35.7936	3.45E+05	3.57E+05	5.02E-02	3.43E-01	0.4597	0.5636	1.3755	0.7065	Tidak Memenuhi
36	5.119	5.306	41.3109	40.6978	2.68E+05	2.76E+05	7.90E-02	5.45E-01	0.3688	0.5324	1.2840	0.7065	Tidak Memenuhi

**LAMPIRAN E**  
**Perhitungan Umur Kelelahan**

**PERHITUNGAN JUMLAH SIKLUS TEGANGAN AKIBAT ALIRAN INTERNAL**

Flowrates (MMscfd)	Tegangan (Pa)	Tegangan (Mpa)	$f_s$ (Hz)	$n_i$ (Cycles)	A	m	$N_i$ (t=22mm) (Cycles)	$N_i$ (t=14.3mm) (Cycles)
75	10936	0.010936	0.082	5.17E+08	1.67E+11	3	1.27E+17	1.16E+17
85	14042	0.014042	0.085	5.36E+08	1.67E+11	3	6.02E+16	5.48E+16
95	17532	0.017532	0.088	5.55E+08	1.67E+11	3	3.09E+16	2.82E+16
105	21411	0.021411	0.093	5.87E+08	1.67E+11	3	1.70E+16	1.55E+16
120	27923	0.027923	0.096	6.05E+08	1.67E+11	3	7.66E+15	6.97E+15

**PERHITUNGAN JUMLAH SIKLUS TEGANGAN AKIBAT ALIRAN EKSTERNAL**

Panjang Span (m)	Tegangan (Pa)	Tegangan (Mpa)	$f_s$ (Hz)	$n_i$ (cycles)	A	m	$N_i$ (t=22mm) (Cycles)	$N_i$ (t=14.3mm) (Cycles)
23	1584800	1.5848	0.7511	4.74E+08	1.67E+11	3	4.19E+10	3.81E+10
30	2680100	2.6801	0.7511	4.74E+08	1.67E+11	3	8.66E+09	7.88E+09
36	3843500	3.8435	0.7511	4.74E+08	1.67E+11	3	2.94E+09	2.67E+09

# **PERHITUNGAN UMUR KELELAHAN PIPA**

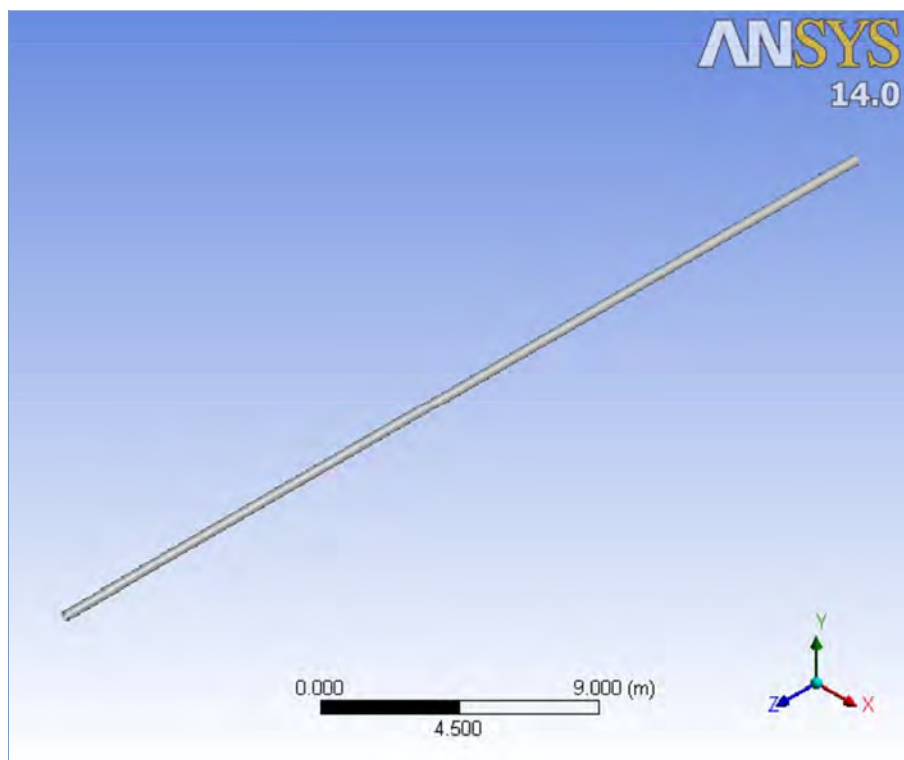
Panjang Span (m)	Kecepatan Arus (m/s)	Flowrates (MMscfd)	ni (fluida internal) (cycles)	ni (Arus) (cycles)	N <sub>i</sub> (fluida internal)	N <sub>i</sub> (arus)	D <sub>fat</sub>	T <sub>life</sub> (tahun)
23	0.7488	75	5.17E+08	4.74E+08	1.16E+17	3.81E+10	1.242E-02	1609.800383
		85	5.36E+08	4.74E+08	5.48E+16	3.81E+10	1.242E-02	1609.799693
		95	5.55E+08	4.74E+08	2.82E+16	3.81E+10	1.242E-02	1609.798407
		105	5.87E+08	4.74E+08	1.55E+16	3.81E+10	1.242E-02	1609.796045
		120	6.05E+08	4.74E+08	6.97E+15	3.81E+10	1.242E-02	1609.789707
30	0.7488	75	5.17E+08	4.74E+08	1.16E+17	7.88E+09	6.009E-02	332.845386
		85	5.36E+08	4.74E+08	5.48E+16	7.88E+09	6.009E-02	332.845357
		95	5.55E+08	4.74E+08	2.82E+16	7.88E+09	6.009E-02	332.845302
		105	5.87E+08	4.74E+08	1.55E+16	7.88E+09	6.009E-02	332.845201
		120	6.05E+08	4.74E+08	6.97E+15	7.88E+09	6.009E-02	332.844930
36	0.7488	75	5.17E+08	4.74E+08	1.16E+17	2.67E+09	1.772E-01	112.853475
		85	5.36E+08	4.74E+08	5.48E+16	2.67E+09	1.772E-01	112.853469
		95	5.55E+08	4.74E+08	2.82E+16	2.67E+09	1.772E-01	112.853459
		105	5.87E+08	4.74E+08	1.55E+16	2.67E+09	1.772E-01	112.853445
		120	6.05E+08	4.74E+08	6.97E+15	2.67E+09	1.772E-01	112.853414

**LAMPIRAN F**  
**Output ANSYS Stactic Structural**



## Project

First Saved	Friday, July 11, 2014
Last Saved	Thursday, July 17, 2014
Product Version	14.0 Release
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



## Contents

- [Units](#)
- [Model \(E4\)](#)
  - [Geometry](#)
    - [Parts](#)
  - [Coordinate Systems](#)
  - [Connections](#)
    - [Contacts](#)
      - [Contact Region](#)
  - [Mesh](#)
  - [Static Structural \(E5\)](#)
    - [Analysis Settings](#)
    - [Loads](#)
    - [Solution \(E6\)](#)
      - [Solution Information](#)
      - [Results](#)
- [Material Data](#)
  - [Structural Steel](#)

## Units

TABLE 1

Unit System	Metric (m, kg, N, s, V, A) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

## Model (E4)

### Geometry

TABLE 2  
Model (E4) > Geometry

Object Name	Geometry
State	Fully Defined
<b>Definition</b>	
Source	L:\tegangan\23 meter_files\dp0\SYS-4\DM\SYS-4.agdb
Type	DesignModeler
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
<b>Bounding Box</b>	
Length X	0.3556 m
Length Y	0.3556 m
Length Z	36. m
<b>Properties</b>	
Volume	0.55198 m <sup>3</sup>
Mass	4333.1 kg
Scale Factor Value	1.
<b>Statistics</b>	
Bodies	2

Active Bodies	2
Nodes	125746
Elements	16480
Mesh Metric	None
<b>Basic Geometry Options</b>	
Parameters	Yes
Parameter Key	DS
Attributes	No
Named Selections	No
Material Properties	No
<b>Advanced Geometry Options</b>	
Use Associativity	Yes
Coordinate Systems	No
Reader Mode Saves Updated File	No
Use Instances	Yes
Smart CAD Update	No
Attach File Via Temp File	Yes
Temporary Directory	C:\Users\HilmanS\AppData\Local\Temp
Analysis Type	3-D
Decompose Disjoint Faces	Yes
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

**TABLE 3**  
**Model (E4) > Geometry > Parts**

Model (24) - Geometry - Parts		
Object Name	Solid	Solid
State	Meshed	
Graphics Properties		
Visible	Yes	
Transparency	1	
Definition		
Suppressed	No	
Stiffness Behavior	Flexible	
Coordinate System	Default Coordinate System	
Reference Temperature	By Environment	
Material		
Assignment	Structural Steel	
Nonlinear Effects	Yes	
Thermal Strain Effects	Yes	
Bounding Box		
Length X	0.1778 m	
Length Y	0.3556 m	
Length Z	36. m	
Properties		
Volume	0.27599 m³	
Mass	2166.5 kg	
Centroid X	0.10843 m	-0.10843 m
Centroid Y	-3.4746e-017 m	9.4762e-018 m
Centroid Z	18. m	
Moment of Inertia Ip1	2.3283e+005 kg·m²	
Moment of Inertia Ip2	2.328e+005 kg·m²	
Moment of Inertia Ip3	37.223 kg·m²	
Statistics		
Nodes	62873	
Elements	8240	
Mesh Metric	None	



## Coordinate Systems

**TABLE 4**  
**Model (E4) > Coordinate Systems > Coordinate System**

Object Name	<i>Global Coordinate System</i>
State	Fully Defined
<b>Definition</b>	
Type	Cartesian
Coordinate System ID	0.
<b>Origin</b>	
Origin X	0. m
Origin Y	0. m
Origin Z	0. m
<b>Directional Vectors</b>	
X Axis Data	[ 1. 0. 0. ]
Y Axis Data	[ 0. 1. 0. ]
Z Axis Data	[ 0. 0. 1. ]

## Connections

**TABLE 5**  
**Model (E4) > Connections**

Object Name	<i>Connections</i>
State	Fully Defined
<b>Auto Detection</b>	
Generate Automatic Connection On Refresh	Yes
<b>Transparency</b>	
Enabled	Yes

**TABLE 6**  
**Model (E4) > Connections > Contacts**

Object Name	<i>Contacts</i>
State	Fully Defined
<b>Definition</b>	
Connection Type	Contact
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
<b>Auto Detection</b>	
Tolerance Type	Slider
Tolerance Slider	0.
Tolerance Value	9.0009e-002 m
Use Range	No
Face/Face	Yes
Face/Edge	No
Edge/Edge	No
Priority	Include All
Group By	Bodies
Search Across	Bodies

**TABLE 7**  
**Model (E4) > Connections > Contacts > Contact Regions**

Object Name	<i>Contact Region</i>
State	Fully Defined
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection

Contact	2 Faces
Target	2 Faces
Contact Bodies	Solid
Target Bodies	Solid
<b>Definition</b>	
Type	Bonded
Scope Mode	Automatic
Behavior	Program Controlled
Suppressed	No
<b>Advanced</b>	
Formulation	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Pinball Region	Program Controlled

## Mesh

**TABLE 8**  
**Model (E4) > Mesh**

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Solved
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
<b>Sizing</b>	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Coarse
Element Size	7.e-002 m
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	1.43e-002 m
<b>Inflation</b>	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
<b>Patch Conforming Options</b>	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
<b>Advanced</b>	
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For Assembly	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
<b>Defeaturing</b>	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Automatic Mesh Based Defeaturing	On

Defeating Tolerance	Default
<b>Statistics</b>	
Nodes	125746
Elements	16480
Mesh Metric	None

## Static Structural (E5)

**TABLE 9**  
**Model (E4) > Analysis**

Object Name	<i>Static Structural (E5)</i>
State	Solved
<b>Definition</b>	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Static Structural
Solver Target	Mechanical APDL
<b>Options</b>	
Environment Temperature	22. °C
Generate Input Only	No

**TABLE 10**  
**Model (E4) > Static Structural (E5) > Analysis Settings**

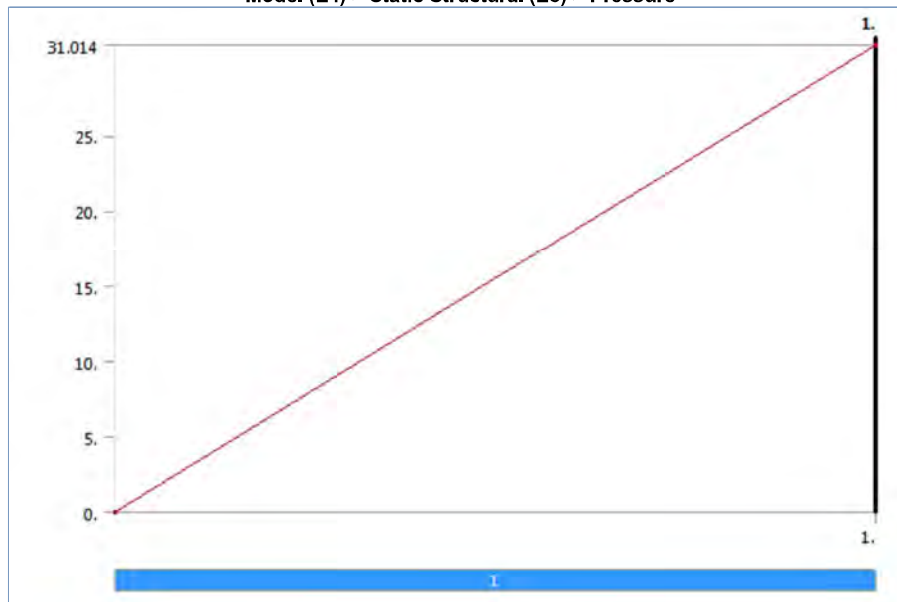
Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
<b>Step Controls</b>	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	Program Controlled
<b>Solver Controls</b>	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	Off
Inertia Relief	Off
<b>Restart Controls</b>	
Generate Restart Points	Program Controlled
Retain Files After Full Solve	No
<b>Nonlinear Controls</b>	
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Stabilization	Off
<b>Output Controls</b>	
Stress	Yes
Strain	Yes
Nodal Forces	No
Contact Miscellaneous	No
General Miscellaneous	No
Calculate Results At	All Time Points
Max Number of Result Sets	Program Controlled
<b>Analysis Data Management</b>	
Solver Files Directory	L:\tegangan\23 meter_files\dp0\SYS-4\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	

Save MAPDL db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	No
Solver Units	Active System
Solver Unit System	mks

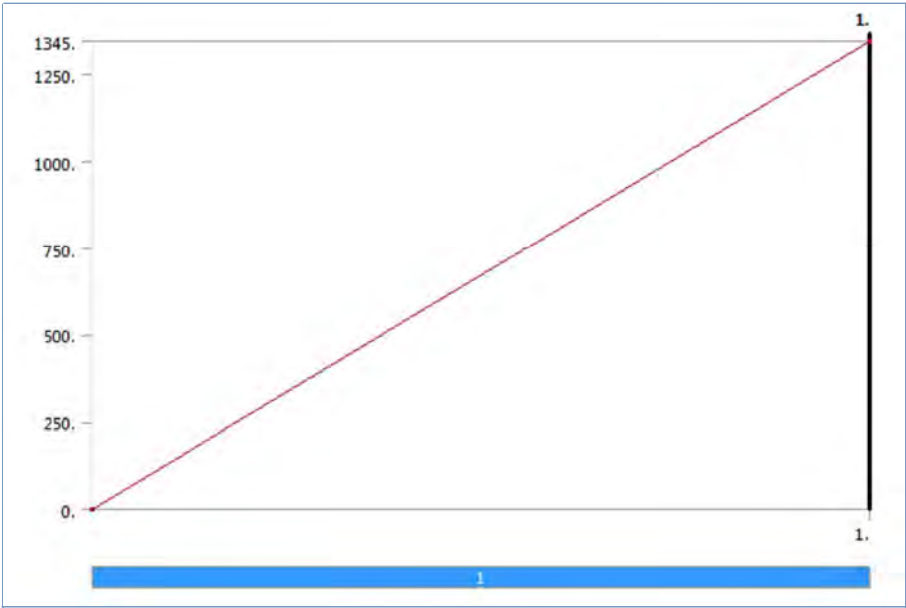
**TABLE 11**  
**Model (E4) > Static Structural (E5) > Loads**

Object Name	Pressure	Pressure 2	Frictionless Support	Displacement
State	Fully Defined			
Scope				
Scoping Method	Geometry Selection			
Geometry	1 Face	2 Faces		
Definition				
Type	Pressure		Frictionless Support	Displacement
Define By	Normal To			Components
Magnitude	31.014 Pa (ramped)	1345. Pa (ramped)		
Suppressed	No			
Coordinate System				Global Coordinate System
X Component				0. m (ramped)
Y Component				Free
Z Component				0. m (ramped)

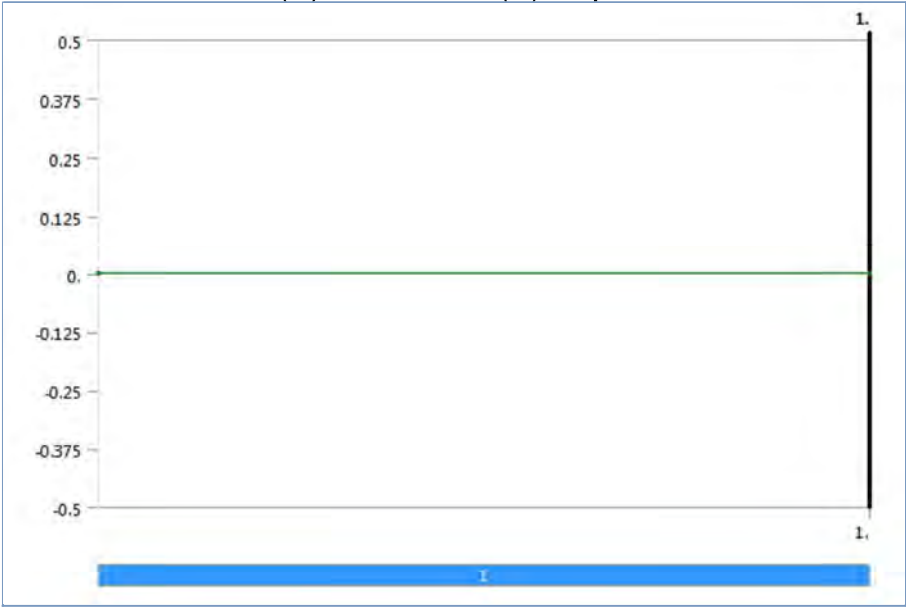
**FIGURE 1**  
**Model (E4) > Static Structural (E5) > Pressure**



**FIGURE 2**  
**Model (E4) > Static Structural (E5) > Pressure 2**



**FIGURE 3**  
**Model (E4) > Static Structural (E5) > Displacement**



**Solution (E6)**

**TABLE 12**  
**Model (E4) > Static Structural (E5) > Solution**

Object Name	Solution (E6)
State	Solved

Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1.
Refinement Depth	2.
Information	
Status	Done

**TABLE 13**  
**Model (E4) > Static Structural (E5) > Solution (E6) > Solution Information**

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
Solution Information	
Solution Output	Solver Output
Newton-Raphson Residuals	0
Update Interval	2.5 s
Display Points	All
FE Connection Visibility	
Activate Visibility	Yes
Display	All FE Connectors
Draw Connections Attached To	All Nodes
Line Color	Connection Type
Visible on Results	No
Line Thickness	Single
Display Type	Lines

**TABLE 14**  
**Model (E4) > Static Structural (E5) > Solution (E6) > Results**

Object Name	Equivalent Stress	Total Deformation
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	All Bodies	
Definition		
Type	Equivalent (von-Mises) Stress	Total Deformation
By	Time	
Display Time	Last	
Calculate Time History	Yes	
Identifier		
Suppressed	No	
Integration Point Results		
Display Option	Averaged	
Results		
Minimum	12039 Pa	2.0619e-008 m
Maximum	3,8464e+006 Pa	1,6608e-002 m
Minimum Occurs On	Solid	
Maximum Occurs On	Solid	
Information		
Time	1. s	
Load Step	1	
Substep	1	
Iteration Number	1	

## Material Data

### Structural Steel

**TABLE 15**

**Structural Steel > Constants**

Density	7850 kg m <sup>-3</sup>
Coefficient of Thermal Expansion	1.2e-005 C <sup>-1</sup>
Specific Heat	434 J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>
Thermal Conductivity	60.5 W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>
Resistivity	1.7e-007 ohm m

**TABLE 16****Structural Steel > Compressive Ultimate Strength**

Compressive Ultimate Strength Pa
0

**TABLE 17****Structural Steel > Compressive Yield Strength**

Compressive Yield Strength Pa
2.5e+008

**TABLE 18****Structural Steel > Tensile Yield Strength**

Tensile Yield Strength Pa
2.5e+008

**TABLE 19****Structural Steel > Tensile Ultimate Strength**

Tensile Ultimate Strength Pa
4.6e+008

**TABLE 20****Structural Steel > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion**

Reference Temperature C
22

**TABLE 21****Structural Steel > Alternating Stress Mean Stress**

Alternating Stress Pa	Cycles	Mean Stress Pa
3.999e+009	10	0
2.827e+009	20	0
1.896e+009	50	0
1.413e+009	100	0
1.069e+009	200	0
4.41e+008	2000	0
2.62e+008	10000	0
2.14e+008	20000	0
1.38e+008	1.e+005	0
1.14e+008	2.e+005	0
8.62e+007	1.e+006	0

**TABLE 22****Structural Steel > Strain-Life Parameters**

Strength Coefficient Pa	Strength Exponent	Ductility Coefficient	Ductility Exponent	Cyclic Strength Coefficient Pa	Cyclic Strain Hardening Exponent
9.2e+008	-0.106	0.213	-0.47	1.e+009	0.2

**TABLE 23****Structural Steel > Isotropic Elasticity**

Temperature C	Young's Modulus Pa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus Pa	Shear Modulus Pa
	2.07e+011	0.3	1.725e+011	7.9615e+010

**TABLE 24**  
**Structural Steel > Isotropic Relative Permeability**

Relative Permeability
10000



## BIODATA PENULIS



Hilman Syarif dilahirkan di Lumajang 07 April 1992. Penulis tinggal di Lumajang tepatnya dan menjalani pendidikan mulai SD hingga SMA di kota Lumajang ini. Lulus dari SMA pada tahun 2010, penulis mengikuti Seleksi Penerimaan Mahasiswa Baru melalui jalur PMDK reguler dan diterima di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama mas perkuliahan, penulis aktif di organisasi kemahasiswaan baik intra maupun ekstra kampus. Organisasi yang pernah diikuti oleh penulis diantaranya adalah Mahagana ITS, LDJ Bahrul Ilmi, Himatekla, serta Imajaya. Selain itu, penulis juga pernah mengikuti pelatihan dan seminar dalam rangka untuk mengembangkan kemampuan dirinya. Penulis juga pernah melakukan Kerja Praktek di PT Rekayasa Industri selama dua bulan. Pada Agustus 2014, penulis menyelesaikan Tugas Akhirnya yang berjudul “Analisis Kelelahan Akibat Aliran Internal dan Beban Eksternal pada Pipa Bawah Laut yang Mengalami *Freespan*”, di bawah bimbingan Bapak Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D serta Ir. J. J. Soedjono, M.Sc.